



**Универзитет „Св. Кирил и Методиј“
во Скопје**



Машински Факултет-Скопје

Институт за Механика

Маја Аначкова

**“АНАЛИЗА НА СИСТЕМИ ЗА АКТИВНА КОНТРОЛА НА
АКУСТИЧНА СРЕДИНА СО ПРИМЕНА НА АДАПТИВНИ
АЛГОРИТМИ”**

Докторски труд

Скопје, 2023

Докторанд: **Маја Аначкова**

Тема: **„АНАЛИЗА НА СИСТЕМИ ЗА АКТИВНА КОНТРОЛА НА АКУСТИЧНА СРЕДИНА СО ПРИМЕНА НА АДАПТИВНИ АЛГОРИТМИ“**

Ментор:

Проф. Д-р ЗЛАТКО ПЕТРЕСКИ,
Машински факултет-Скопје
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“

Комисија за одбрана:

Проф.д-р ДАМЕ КОРУНОСКИ, претседател
УКИМ, Машински Факултет-Скопје

Проф.д-р ЗЛАТКО ПЕТРЕСКИ, ментор
УКИМ, Машински Факултет-Скопје

Проф.д-р КОЧО АНЃУШЕВ,
УКИМ, Машински Факултет-Скопје

Проф.д-р ВИКТОР ГАВРИЛОСКИ,
УКИМ, Машински Факултет-Скопје

Проф.д-р ДЕЈАН МИРАКОВСКИ,
УГД, Факултет за природни и технички науки, Штип

Научна област: МАШИНСТВО

Датум на одбрана: **19.04.2023**

АПСТРАКТ

Оваа докторска дисертација го дава својот допринос во научно-истражувачката и апликативната област посветена на системите за активна контрола на акустична средина. Продлабочените анализи и истражувања спроведени во неа резултираат во согледување на потенцијалот за развој и примена на овие системи во физички и реално-временски услови, како и за донесување на заклучоци за нивните можности и предизвици.

Во Глава 1 се претставени мотивацијата, целите и придобивките од ова истражување, како и преглед на постоечки истражувања во областа. Методологијата на истражување е спроведена во насока на успешно постигнување на целите кои се зададени во рамките на оваа докторска дисертација. Резултатите од опсежните анализи и реализацијата на предвидените цели ги потврдија и главната и помошната хипотеза кои беа поставени.

Во Глава 2 се претставени анализи и мерења поврзани со стандардните, пасивни методи за контрола на непосакуваниот звук во животната средина преку кои беше донесен заклучок за нивните недостатоци во справувањето со бучавата на ниски фреквенции. Како резултат на овие заклучоци, се потврди потребата од истражување на системите за активна контрола на звукот со која се сугерира на примена на овие системи за отстранување на ниско-фреквентни звуци.

Во Глава 3 е спроведено моделирање и симулација на акустична средина со одбрани карактеристики. Со овие анализи беа утврдени условите за имплементација на системот за активна контрола, како и физичките ограничувања и техничките предизвици за реализација на ваков систем со оптимални перформанси.

Во Глава 4, преку моделирање и симулација на системот за активна контрола на звук, анализирана е примената на три различни адаптивни алгоритми. Резултатите од овие анализи укажаа на препознавање на карактеристиките на секој од адаптивните алгоритми преку предложените параметри за идентификација на нивниот перформанс. Овие заклучоци укажаа кон појасни насоки за избор на соодветен адаптивен алгоритам за реализација на хардверска имплементација на системот за активна контрола.

Сите претходно спроведени анализи, како и сознанијата од нив послужија за физичка изведба на експериментален систем за активна контрола на едно-димензионална акустична средина во реално време која е елаборирана во Глава 5. Со постигнување на функционалност на овој систем, покажана е неговата изводливост и потенцијалот за негова примена во реални апликации.

Во Глава 6 се претставени сублимираните резултати од деталните анализи во рамките на докторската дисертација, како и препораките за идни истражувања во оваа област.

SUMMARY

This doctoral dissertation provides a contribution to the scientific, research and application field dedicated to systems for active control (ANC) of the acoustic environment. The in-depth analyzes and the carried out research within, result in understanding the potential for the development and application of these systems in physical and real-time conditions, as well as in drawing conclusions about their opportunities and challenges.

In Chapter 1, the motivation, goals, and benefits of this research are presented, as well as a literature review in the field. The research methodology was carried out in direction of successfully achieving the goals set within this doctoral dissertation. The results of the extensive analyzes and the realization of the foreseen goals confirmed both the main and auxiliary hypothesis that have been proposed.

In Chapter 2, analyzes and measurements related to standard, passive methods of controlling unwanted sound in the environment were presented, resulting in conclusions about their shortcomings in dealing with low-frequency noise. Consequently, the need for research of active noise control systems was confirmed, suggesting the application of these systems for the suspension of low-frequency sounds.

In Chapter 3, modeling and simulation of an acoustic environment with selected characteristics is developed. These analyzes determined the conditions for the implementation of the active control system, as well as the physical limitations and technical challenges for ensuring the implementation of such a system with optimal performance.

In Chapter 4, through modeling and simulation of the active sound control system, the application of three different adaptive algorithms is analyzed. The outcomes of these analyzes indicated the recognition of the characteristics of each of the adaptive algorithms through the proposed parameters for identifying their performance. These conclusions pointed to clearer directions for the selection of an appropriate adaptive algorithm for realization of the hardware implementation of the active control system.

All previously conducted analyses, as well as the knowledge acquired from them, served for development of an experimental system for active control of a one-dimensional acoustic environment in real time, which is presented in Chapter 5. By achieving the functionality of this system, the potential for its application in real applications has been demonstrated.

Chapter 6 presents the sublimated results of the detailed analyzes within all Chapters in the doctoral dissertation, as well as the future research recommendations.

Изјавувам дека докторскиот труд е оригинален труд што го имам изработено самостојно.

м-р Маја Аначкова

Изјавувам дека електронската верзија на докторскиот труд е идентична со отпечатениот докторски труд.

м-р Маја Аначкова

Предговор

Ја користам оваа прилика да ја изразам мојата неизмерна благодарност до сите оние кои придонесоа за успешното завршување на мојата докторска дисертација и кои беа со мене во процесот на мојот професионален и личен развој последните години.

Најголем придонес во реализацијата на докторската дисертација има мојот професор и ментор, проф. д-р Златко Петрески кому би сакала да изразам искрена благодарност за неговата мотивација и доверба во текот на моите докторски студии. Неговите несебични совети и поддршка го олеснија остварувањето на оваа докторска дисертација, како и патот на мојот академски напредок и успех.

Би сакала да изразам и огромна искрена благодарност до проф. д-р Виктор Гаврилоски за неговата значајна поддршка, внимание и совети од кои научив многу. Особена голема благодарност до проф. д-р Кочо Анѓушев на кого се угледувам и се гордеам што имам прилика да го познавам, но и одблизу да соработувам како негов асистент. Голема благодарност и до проф. д-р Даме Коруноски за пријатната соработка и поддршка. Благодарност и до надворешниот член на комисијата проф. д-р Дејан Мираковски за прегледување и оценка на дисертацијата.

За огромната поддршка и помош во остварувањето на докторската дисертација изразувам благодарност и до останатите членови на Институтот за Механика, асс. м-р Анастасија Игњатовска, асс. м-р Дејан Шишковски и м-р Дамјан Пециоски, а најмногу до мојата најблиска соработничка и пријателка, доцент д-р Симона Домазетовска. Неизмерно сум благодарна што имам среќа да имам таков работен партнер со кој го споделувам мојот академски раст и бројните работни искуства, но и многу добар пријател кој е секогаш тука да ме охрабри, мотивира и олесни.

Благодарна сум на сите мои пријатели и најблиски кои беа тука да ме поддржат и охрабрат во овој процес, а особено на Дарко, Мартина и Наташа.

Посебна и огромна благодарност чувствувам кон Влатко, кој со голема љубов, трпение и посветеност беше тука за мене секој ден.

Оваа докторска дисертација ја посветувам на мојата мајка, Фредерика.

Мамо, бескрајно сум благодарна за твојата неизмерна и безрезервна поддршка, љубов, внимание и посветеност без кои ниедно мое остварување нема да има толкава вредност. Се надевам дека овој мој успех ќе те направи многу горда, затоа што тоа беше мојата единствена најголема и најсилна мотивација низ сите овие години, а ќе остане и понатаму. Ти благодарам за сè.

Од срце.
Маја Аначкова

СОДРЖИНА

АПСТРАКТ	ii
SUMMARY	iii
Предговор	v
СОДРЖИНА.....	vi
ЛИСТА НА СЛИКИ	ix
ЛИСТА НА ТАБЕЛИ.....	xiii
1. ВОВЕД	1
1.1. МОТИВАЦИЈА НА ИСТРАЖУВАЊЕТО	3
1.2. ПРЕГЛЕД НА ПРЕТХОДНИ ИСТРАЖУВАЊА.....	5
1.2.1. Методи за контрола на бучавата со користење на техниките за пасивна контрола.....	6
1.2.2. Методи за контрола на бучавата со користење на техниката за активна контрола.....	10
1.3. ЦЕЛИ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО.....	16
1.4. ХИПОТЕЗИ.....	17
1.5. МЕТОДОЛОГИЈА НА ИСТРАЖУВАЊЕТО	17
1.6. ПРИДОБИВКИ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО.....	18
2. АНАЛИЗА НА СТАНДАРДНИ МЕТОДИ ЗА КОНТРОЛА НА БУЧАВАТА ВО ЖИВОТНАТА СРЕДИНА.....	20
2.1. ВЛИЈАНИЕ НА СООБРАЌАЈНАТА БУЧАВА ВО ВКУПНОТО НИВО НА БУЧАВА ВО ЖИВОТНАТА СРЕДИНА	21
2.1.1. Избор на мерна локација	22
2.2. ПРОЦЕНКА НА ВЛИЈАНИЕТО НА СООБРАЌАЈНАТА БУЧАВА ПРЕКУ МЕТОДОТ НА ПРОТОК НА ВОЗИЛА.....	24
2.2.1. Проток на возила.....	24
2.2.2. Креирање на карта на бучава	25
2.3. ПРОЦЕНКА НА ВЛИЈАНИЕТО НА СООБРАЌАЈНА БУЧАВА ПРЕКУ МЕТОДОТ НА ТЕМПОРАЛНО СЕМПЛИРАЊЕ.....	27
2.4. КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ ОД МЕТОДИТЕ ЗА ПРОЦЕНКА НА ВЛИЈАНИЕТО НА СООБРАЌАЈНАТА БУЧАВА	28

2.5.	АНАЛИЗА НА ЕФИКАСНОСТА НА ЗВУЧНИТЕ БАРИЕРИ КАКО МЕТОД ЗА ПАСИВНА КОНТРОЛА НА СООБРАЌАЈНАТА БУЧАВА.....	30
2.5.1.	Пристапи за одредување на ефективноста на звучната бариера	32
2.5.2.	Имплементација на индиректен метод за проценка на перформансот на звучните бариери.....	35
2.5.3.	Резултати од применетиот метод за анализа на ефикасноста на звучните бариери	39
2.6.	ЗАКЛУЧОЦИ ОД ПРИМЕНЕТИТЕ МЕТОДИ ЗА ПРОЦЕНКА И КОНТРОЛА НА ВЛИЈАНИЕТО НА СООБРАЌАЈНАТА БУЧАВА	42
3.	МОДЕЛИРАЊЕ И СИМУЛАЦИЈА НА ЕДНОДИМЕНЗИОНАЛНА АКУСТИЧНА СРЕДИНА ...	44
3.1.	КАРАКТЕРИСТИКИ НА АКУСТИЧНА СРЕДИНА.....	45
3.1.1.	Равенка на бран.....	45
3.1.2.	Теорија на рамни бранови	47
3.1.3.	Акустична импеданса	49
3.1.4.	Интензитет на рамен бран	49
3.1.5.	Карактеристики на едnodимензионална акустична средина во канал	51
3.1.6.	Режими во канали.....	51
3.1.7.	Акустично поле во канал со кружен напречен пресек.....	53
3.2.	МОДЕЛИРАЊЕ И СИМУЛАЦИЈА НА АКУСТИЧНА СРЕДИНА ВО КАНАЛ СО КОРИСТЕЊЕ НА МЕТОДОТ НА КОНЕЧНИ ЕЛЕМЕНТИ (МКЕ)	54
3.2.1.	Моделирање на акустичен канал.....	55
3.2.2.	Физички карактеристики на моделот.....	56
3.2.3.	Гранични услови.....	57
3.2.4.	Студија за акустичниот притисок во фреквентен домен.....	58
3.2.5.	Симулација на акустична средина во канал.....	59
3.3.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ВАЛИДАЦИЈА НА КАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА АКУСТИЧНАТА СРЕДИНА ВО КАНАЛ	65
3.3.1.	Методологија	66
3.3.2.	Применета инструментација.....	66
3.3.3.	Резултати од спроведените мерења	67
3.4.	ЗАКЛУЧОЦИ ОД СПРОВЕДЕНИТЕ АНАЛИЗИ	69
4.	МОДЕЛИРАЊЕ И СИМУЛАЦИЈА НА СИСТЕМ ЗА АКТИВНА КОНТРОЛА НА ЗВУК СО ПРИМЕНА НА АДАПТИВНИ АЛГОРИТМИ.....	72
4.1.	АНАЛИТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ НА АКТИВНА КОНТРОЛА НА СИГНАЛ СО КОРИСТЕЊЕ НА MATLAB/SIMULINK.....	73

4.1.1. Модел на системот за активна контрола на аудио сигнал во Matlab/Simulink	74
4.1.2. Хардверски систем за аквизиција на аудио датотеки во MATLAB со помош на NI cDAQ 9174 и NI 9234.....	75
4.1.3. Имплементација на системот	76
4.2. АНАЛИЗА НА ПРИМЕНАТА НА LMS АДАПТИВНИОТ АЛГОРИТАМ	77
4.3 АНАЛИЗА НА ПРИМЕНАТА НА RLS АДАПТИВНИОТ ФИЛТЕР	83
4.4 АНАЛИЗА НА ПРИМЕНАТА НА NLMS АДАПТИВНИОТ ФИЛТЕР	91
4.5 КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА НА РЕЗУЛТАТИТЕ.....	98
4.6 ЗАКЛУЧОЦИ.....	99
5. РЕАЛИЗАЦИЈА НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН СИСТЕМ ЗА АКТИВНА КОНТРОЛА НА АКУСТИЧНА СРЕДИНА.....	101
5.1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТУЛАЦИЈА НА СИСТЕМОТ ЗА АКТИВНА КОНТРОЛА НА АКУСТИЧНА СРЕДИНА.....	102
5.2. ПРИМЕНА НА АДАПТИВНИТЕ АЛГОРИТМИ	105
5.3. LABVIEW МОДЕЛ ЗА КОНТРОЛА НА СИСТЕМОТ	109
5.4 РЕЗУЛТАТИ.....	113
5.5. ЗАКЛУЧОЦИ.....	117
6. ЗАКЛУЧОЦИ И ПРЕПОРАКИ ЗА ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА.....	119
6.1. ЗАКЛУЧОЦИ.....	120
6.2. ПРЕПОРАКИ ЗА ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА.....	122
6.2.1. Подобрвање на системот за активна контрола на акустична средина	123
6.2.2. Предлог за развој на концепт на три-димензионални „тивки“ зони.....	124
ЛИТЕРАТУРА.....	127

ЛИСТА НА СЛИКИ

ГЛАВА 1

Слика 1-1: Методи за контрола на непосакуван звук.....	6
---	---

ГЛАВА 2

Слика 2-1: Последни статистики за бројот на регистрирани возила во тек на 5 години согласно Државниот завод за статистика.....	22
Слика 2-2: Месечно и дневно ниво на бучава на локацијата „Дебар Маало“.....	23
Слика 2-3: Областа “Дебар Маало” и четирите булевари кои ја ограничуваат.....	23
Слика 2-4: Методологија за креирање на предиктивна мапа на сообраќајна бучава...24	
Слика 2-5: Предиктивни мапи на бучава за L_{eq} креирани од податоците за „Дебар Маало“.....	27
Слика 2-6: Локација на мерните точки во населбата „Дебар Маало“ и фотографии од мерењата.....	27
Слика 2-7: L_{eq} за четирите мерни точки за сите три периоди од денот.....	29
Слика 2-8: Разлики во резултатите добиени од двете методологии.....	30
Слика 2-9: Шематски приказ на функцијата на звучните бариери.....	31
Слика 2-10: Дијаграм на пристапи за одредување на ефикасноста на звучните бариери.....	33
Слика 2-11: Параметри за определување на ефикасноста на звучната бариера.....	34
Слика 2-12: Мерни локации на звучни бариери во градот Скопје (лево: Обиколница, десно: во Центарот на градот).....	36
Слика 2-13: Поставување на мерните точки.....	37
Слика 2-14: Фотографии од мерните локации на Обиколницата во градот и фреквентните спектри од бучавата во измерените временски интервали.....	38
Слика 2-15: Фотографии од мерните локации на во Центарот на градот и фреквентните спектри од бучавата во измерените временски интервали.....	38
Слика 2-16: Резултати од измерените вредности за бучавата пред и позади бариерата поставена на Обиколницата во градот Скопје.....	39
Слика 2-17: Резултати од измерените вредности за бучавата пред и позади бариерата поставена во Центарот на градот Скопје.....	40
Слика 2-18: Резултати од измерените вредности за бучавата на мерните локации без и со звучна бариера на Обиколницата во градот Скопје.....	41
Слика 2-19: Резултати од измерените вредности за бучавата на мерните локации без и со звучна бариера во Центарот на Скопје.....	41

ГЛАВА 3

Слика 3-1: Пропагација на звучен притисок.....	48
Слика 3-2: Графичка репрезентација на векторите на моќност и интензитет на рамен бран	50
Слика 3-3: Визуелна репрезентација на рамен бран во канал	52
Слика 3-4: Илустративен приказ на методот и условите за примена на МКЕ моделирање	56
Слика 3-5: Приказ на геометријата на моделот креиран во COMSOL 5.5 и мрежата на конечни елементи	56
Слика 3-6: Моделирање на почетните услови во COMSOL 5.5	57
Слика 3-7: Задавање на параметри за моделирање во COMSOL 5.5.....	58
Слика 3-8: Ниво на звучен притисок од примарниот, секундарниот извор и на излезот од каналот	59
Слика 3-9: Ниво на звучен притисок пред (колона лево) и после вклучување на контролниот извор на звук (колона десно)	65
Слика 3-10: Шема на применета инструментација за експериментален модел	67
Слика 3-11: Ниво на звучен притисок на влез и на излез од каналот	68
Слика 3-12: Гранични вредности на нивото на јачина на звукот	69
Слика 3-13: Споредба на нивото на звучен притисок од МКЕ анализата и лабораториските мерења.....	70

ГЛАВА 4

Слика 4-1: MATLAB/Simulink модел на системот за активна контрола на звук	74
Слика 4-2: Мерна инструментација за аквизиција на аудио сигнали.....	75
Слика 4-3: Експериментално поставување на потребните хардверски компоненти.....	76
Слика 4-4: Блок-дијаграм на адаптивен дигитален филтер со алгоритам на најмали средни квадрати.....	77
Слика 4-5: Резултати од примена на LMS адаптивниот филтер на 10 фреквенции во временски домен	79
Слика 4-6: Амплитудно-временски приказ на намалување на фреквенцијата од 400 Hz со $\mu=0,09$	80
Слика 4-7: Конвергенција на тежинските коефициенти на фреквенција од 400 Hz со $\mu=0,09$	80
Слика 4-8: Амплитудно-временски приказ на намалување на фреквенцијата од 400 Hz со $\mu=0,005$	81
Слика 4-9: Конвергенција на тежинските коефициенти на фреквенција од 400 Hz со $\mu=0,005$	81
Слика 4-10: Минимална средна квадратна грешка при примена на LMS филтерот на сите 10 фреквенции со чекор $\mu=0,005$	82
Слика 4-11: Минимална средна квадратна грешка при примена на LMS филтерот на сите 10 фреквенции со чекор $\mu=0,09$	83

Слика 4-12: Блок дијаграм на адаптивен дигитален филтер со рекурзивен алгоритам на најмали квадрати	84
Слика 4-13: Резултати од примена на RLS адаптивниот филтер на 10 фреквенции во временски домен	87
Слика 4-14: Амплитудно-временски приказ на намалување на фреквенцијата од 200 Hz со $\lambda=0,2$	87
Слика 4-15: Конвергенција на тежинските коефициенти на фреквенција од 200 Hz со $\lambda=0,2$	88
Слика 4-16: Амплитудно-временски приказ на намалување на фреквенцијата од 200 Hz со $\lambda=0,7$	88
Слика 4-17: Конвергенција на тежинските коефициенти на фреквенција од 200 Hz со $\lambda=0,7$	88
Слика 4-18: Амплитудно-временски приказ на намалување на фреквенцијата од 200 Hz со $\lambda=1$	89
Слика 4-19: Конвергенција на тежинските коефициенти на фреквенција од 200 Hz со $\lambda=1$	89
Слика 4-20: Минимална средна квадратна грешка при примена на RMS филтерот на сите 10 фреквенции со „фактор на заборавање“ $\lambda=0,2$	90
Слика 4-21: Минимална средна квадратна грешка при примена на RMS филтерот на сите 10 фреквенции со „фактор на заборавање“ $\lambda=0,7$	90
Слика 4-22: Минимална средна квадратна грешка при примена на RMS филтерот на сите 10 фреквенции со „фактор на заборавање“ $\lambda=1$	91
Слика 4-23: Резултати од примена на NLMS адаптивниот филтер на 10 фреквенции во временски домен	94
Слика 4-24: Амплитудно-временски приказ на намалување на фреквенцијата од 800 Hz со $\mu=0,09$	95
Слика 4-25: Конвергенција на тежинските коефициенти на фреквенција од 800 Hz со $\mu=0,09$	95
Слика 4-26: Амплитудно-временски приказ на намалување на фреквенцијата од 800 Hz со $\mu=0,005$	95
Слика 4-27: Конвергенција на тежинските коефициенти на фреквенција од 800 Hz со $\mu=0,09$	96
Слика 4-28: Минимална средна квадратна грешка при примена на NLMS филтерот на сите 10 фреквенции со големина на чекор $\mu=0,005$	97
Слика 4-29: Минимална средна квадратна грешка при примена на NLMS филтерот на сите 10 фреквенции со големина на чекор $\mu=0,09$	97
Слика 4-30: Минимална средна квадратна грешка при примена на LMS, RLS и NLMS филтерот на сите 10 фреквенции	99

ГЛАВА 5

Слика 5-1: Шематски приказ на системот за активна контрола на акустична средина	103
Слика 5-2: Експериментална постулација на системот за активна контрола	104

Слика 5-3: Поставување на мерен инструмент за бучава Bruel&Kjaer од Класа 1	104
Слика 5-4: Блок-дијаграм на моделирање на секундарната патека	106
Слика 5-5: Блок-дијаграм на моделирање на системот со повратна врска за активна контрола со FxLMS алгоритмот.....	107
Слика 5-6: Структура на програмската околина во LabView.....	110
Слика 5-7: Блок-дијаграм на реално-временскиот модел од системот	111
Слика 5-8: Кориснички интерфејс за фазата на определување на секундарната патека	112
Слика 5-9: Кориснички интерфејс за фазата на спроведување на активната контрола	113
Слика 5-10: Временско-амплитудни сигнали на јачината на звукот на сите 10 тестирани фреквенции во LabView моделот пред и по примена на активната контрола	115
Слика 5-11: Компарација на нивото на јачина на звукот на тестираните фреквенции пред и по примена на активната контрола.....	116
Слика 5-12: Процентуално намалување на нивото на јачина на звукот.....	116

ГЛАВА 6

Слика 6-1: Концепт на три-димензионален систем за активна контрола на звук.....	125
--	-----

ЛИСТА НА ТАБЕЛИ

ГЛАВА 2

Табела 2.1: Усреднет број на возила за трите периоди од избраниот ден25

Табела 2.2: Измерени вредности за нивото на бучава на четирите крстосници28

ГЛАВА 3

Табела 3.1: Карактеристики на материјалот на каналот57

ГЛАВА 4

Табела 4.1: Карактеристики на LMS адаптивен филтер77

Табела 4.2: Карактеристики на RLS адаптивниот филтер84

Табела 4.3: Карактеристики на NLMS адаптивниот филтер92

1

ВОВЕД

Во последните децении, бројот на луѓе кои живеат во урбанизирана животна средина станува сè поголем. Како што се предвидува во [1], до крајот на следната деценија, повеќе од 60% од светското население ќе живее во големи и пренаселени градски средини. Како последица на променетата инфраструктура и зголемената популација на светско ниво, извесно е дека урбаните средини ќе се соочат со драстично зголемено ниво на бучава.

Согласно бројните истражувања посветени на проблемот со бучавата во резиденцијалните и работните средини, како главни причинители за зголеменото ниво на бучава се наведуваат интензивната глобализација, индустријализација и механизација преку зачестените градежни активности, како и динамичниот транспорт. Од друга страна, ограничувања на градежните трошоци резултираат во тенденција да се користат што полесни материјали за изградба на објектите и транспортните средства што дополнително предвидува зголемување на нивото на бучава во внатрешни услови [2]. Воедно, проблемите со бучавата станаа сè поевидентни со сè почестата употреба на возилата, авионите, индустриските машини, турбините, компресорите, трансформаторите и вентилационите или климатизационите единици кои како звучни извори се карактеризираат со изразена бучава на ниски фреквенции. Имено, за разлика од средно и високо-фреквентната бучава, ниско-фреквентната бучава под 250 [Hz] чии извори се сè почести се одликува со лесна пропација низ препреки и дисперзија низ поголеми растојанија со помал губиток на енергија поради намалената апсорпција. Поради овие причини, класичните уреди за заштита од бучава имаат намалена ефикасност за отстранување на ниско-фреквентниот звук [3]. Од друга страна, последиците од ниско-фреквентната бучава врз здравјето на луѓето се често посериозни од оние кои може да се појават од бучавата на повисоки фреквенции. Ниско-фреквентната бучава не само што е вознемирувачка при изложеност на подолги периоди, туку истовремено многу често може да предизвика вртоглавица и губиток на концентрација кое соодветно резултира во намалување на продуктивноста на луѓето изложени на неа [4].

Конвенционалните начини за намалување на проблемот со бучавата го користат методот за пасивно намалување на бучавата преку поставување на звучни бариери, пригушувачи, апсорбирачки материјали, изолациони ѕидови и штитници кои имаат способност за заштита од бучава во широк фреквентен опсег. Но, истражувањата покажуваат дека користењето на пасивните техники покажува подобри перформанси на повисоки фреквенции и не е доволно ефикасно за апсорбирање на ниско-фреквентниот звук. Овој недостаток се должи на тоа што на овие ниски фреквенции, акустичните бранови должини се големи во споредба со дебелината на типичните апсорбери на звук, а истовремено е тешко да се пренасочат во случаи кога звучната бариера не е исклучително робусна [5]. Поради овие причини, ваквите проблеми често е тешко да се решат бидејќи техничките решенија мора да бидат скапи, тешки и масивни. Поради големото присуство на ниските фреквенции во акустичните средини и зачестеноста на изворите на истите, бројни и од практичен аспект важни акустични проблеми со ниско-фреквентната бучава стануваат доминантни и е непожелно да се игнорираат.

Ограничувањата на пасивните методи наметнуваат потреба од нови технички решенија за решавање на проблемот за намалување на ниско-фреквентниот звук кој е доминантен составен дел од урбаната бучава [6]. Во последните години во светот, предмет на интензивно истражување претставуваат системите за активна контрола на звукот кои побудија значителен интерес и претставуваат ветувачко решение за проблемот со контрола на ниско-фреквентната бучава. Во текот на последните две децении, истражувањата во академската и индустриската област во технологијата за активна контрола на звукот, сугерираат дека примарните звучни нарушувања може да се мешаат и контролираат преку генерирани секундарни звучни нарушувања [7]. Активната контрола подразбира електро-акустичен или електро-механички систем кој го поништува примарниот (непосакуван) звук врз база на методот на суперпозиција, генерирајќи анти-звук со еднаква амплитуда и спротивна фаза на примарниот, кој се комбинира со примарниот звук резултирајќи во поништување или намалување на обата звуци. Принципот на активната контрола ги користи долгите бранови должини поврзани со звукот со ниска фреквенција и работи на принципот на деструктивна интерференција помеѓу звучните полиња генерирани од оригиналниот примарен извор на звук преку други секундарни извори, чии акустични излези можат да се контролираат [8]. Главната цел на системите за активна контрола на звукот е постигнување на најмала разлика помеѓу примарниот и секундарниот звук во посакуваната „тивка“ зона, односно минимизирање на резидуалниот звук помеѓу двата звучни извори. Базирано на оваа фундаментална суперпозиција на бранови, технологијата имплементирана во системите за активна контрола се развива многу брзо бидејќи овозможува подобрувања во контролата на звук, често со потенцијални придобивки за големината, тежината, волуменот и трошоците кои произлегуваат од користењето на конвенционалните методи. Во последните години, активната контрола на звукот стана атрактивно средство за постигнување големо намалување на звучниот интензитет особено на ниските фреквенции. Досега, многу апликации на активната контрола на звук вклучуваат реални

и симулирани експерименти кои се усвоени во многу технички индустриски решенија [9]. Согласно многубројните истражувања во областа, ваквите активни системи значително ефикасно ја апсорбираат ниско-фреквентната бучава онаму каде пасивните методи се или неефикасни или се премногу скапи и гломазни.

Денес, со брзорастечката модернизација и брзиот технолошкиот развој на моќни и евтини процесори за обработка на дигиталните сигнали се охрабрува имплементацијата на напредни адаптивни алгоритми за постигнување побрза конвергенција, зголемена робусност и подобрени перформанси на системите за активна контрола на звукот. Напредните технологии за обработка на звучните сигнали во реално време нудат можности за развој на овие активни системи за контрола на звукот кои сè повеќе го наоѓаат своето место во модерното опкружување каде проблемот со намалување на бучавата добива приоритетен статус.

1.1. МОТИВАЦИЈА НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

Технолошките достигнувања и иновациите во современиот инженерски свет претставуваат главна мотивација за развој на нови и напредни системи кои сè повеќе се посветени на решавање на проблемите кои се јавуваат во урбаните средини со зголемена популација и индустријализација. Како последица на динамичната урбана средина, распространетата механизација, како и зголемениот и зачестен патен и авио-транспорт, неопходна станува потребата од инженерски системи кои ќе даваат прецизни резултати, информации и реакции во реално време. Имено, свесноста за деградирачкото влијание на бучавата како еден од главните предизвици со кои се соочува современото општество ја иницираше потребата од создавање на нови иновативни технички решенија преку имплементација на последните пронајдоци во сензорската и процесорската технологија [10].

Потребата од решавање на проблемот со бучавата доведува до развој на конвенционалните начини на справување со бучавата кои подразбираат користење на пасивните методи. Овие методи класично се во вид на апсорбери, рефлектирачки површини, звучни бариери или во вид на заштитници за уши. Меѓутоа, ваквите техники се често непрактични од аспект на големина, тежина и висока цена, но дополнително се и неефикасни при намалување на бучавата со ниско-фреквентна содржина. Како последица на воочените недостатоци на пасивната контрола на звукот, во последните две децении, интензивен интерес кон развој на системи за надминување на ограничувањата на пасивните методи доби методот за активна контрола на звукот [11].

Модерната технологија за справување со проблемот на ниско-фреквентна бучава која подразбира активна контрола на звукот е техника за отстранување на непожелната бучава преку контролабилен секундарен извор на звук. Успешната примена на активна контрола на бучавата бара да има добро просторно и добро временско совпаѓање на примарниот и секундарниот извор во акустичното поле со цел да се обезбеди

отстранување на сигналот во временски и просторен домен [12]. Барањето за просторно совпаѓање доведува до јасни ограничувања на горната фреквентна граница, поради физичкото барање акустичната бранова должина да биде мала во споредба со зоната на контрола. Барањето за временско совпаѓање бара систем за процесирање на звучните сигнали кој може да се прилагоди на промените на примарниот звук. Активната контрола на звукот е широко поле во кое е неопходно познавање на различни специјализирани области како што се акустиката, дигиталната обработка на сигнали, адаптивните алгоритми и имплементација на дигитални процесорски единици [13].

Компонентите на системите за активна контрола на звук вклучуваат секундарен извор на звук, барем еден звучен сензор и контролна единица која вообичаено е дигитален сигнален процесор. Концептот за активна контрола на звукот не е нова идеја и датира од 1936 година со патентот на Пол Лег од САД. Подоцна во 1950-тите, биле конструирани првите активни системи за контрола на звук. Во наредните дваесетина години, развојот на ваквите системи бил запрен поради недостаток на потребната технологија за нивно надградување, бидејќи со тогашните постојни техники за рачно анализирање, било исклучително тешко да се произведе секундарен звук што има амплитуда и фаза потребни за да се намали примарниот звук. Конечно, со појавата на микропроцесорите во 1970-тите било овозможено да се применат техники и уреди за обработка на дигитални сигнали и конструирање на практични активни системи. Од 1970-тите, дигиталните системи почнуваат интензивно да се развиваат и да стануваат сè попростапни [14]. Обновениот интерес за активните системи за контрола на звукот во последните децении може првенствено да се поврзе со достапноста и ниската цена на новите технологии кај дигиталните процесорски единици за обработка на сигналите, како и усовершениот развој на алгоритмите за контрола [15].

Во денешно време, активната контрола на звукот има различни примени, од активни заштитници за слух и слушалки до активна контрола на бучавата во кабините на воздухопловите. Во зависност од апликацијата, концептот на активна контрола на звукот може да се имплементира со користење на различни стратегии за контрола. Во процесот на изградба на системите за активна контрола на акустична средина, голем предизвик претставува процесот на избирање на соодветен адаптивен алгоритам, односно да се избере алгоритам кој најдобро ќе се прилагоди и ќе одговори на карактеристиките на звучниот извор за кој е креиран самиот систем [16]. Процесот се состои во тоа да правилно се препознае и дефинира природата на звукот од примарниот извор, односно да се дефинира фреквентниот ранг и фреквентната содржина на изворниот звук. Изборот на адаптивниот алгоритам директно влијае кон изборот на адаптивен филтер кој има задача да го реконструира примарниот акустичен звук преку моделирање на адаптивните коефициенти на филтерот. Изборот на соодветен алгоритам има клучна улога во ефикасноста на активниот систем од аспект на прецизност и брзина во препознавање на примарниот сигнал и одговор на истиот во реално време. Земајќи ги во предвид истражувањата во [17-29], предмет на оваа докторска дисертација ќе биде

изградба на експериментален систем за активна контрола на еднодимензионална акустична средина, преку анализа на можностите на соодветните хардверски компоненти потребни за истиот, со осврт на примената на адаптивните алгоритми за контрола на активниот систем.

Со користење на дигиталните процесорски единици и технологијата на адаптивно филтрирање на сигналите е овозможено прецизно филтрирање на звукот и негова репродукција во реално време, кое претставува голема можност за реализација на активните системи за контрола на акустичните средини и нивна примена во реални системи [30]. Преку користење на модулите за сигнална аквизиција и контрола се овозможува реално-временска обработка на звучните сигнали и нивна адаптивна контрола што резултира во реализација на активен систем кој ќе овозможи негова примена во процеси каде справувањето со ниско-фреквентната бучава претставува голем предизвик. Реалните секојдневни звучни сценарија со кои се соочува индустријата бара справување со ниско-фреквентен звук со различни фреквентни карактеристики за кои се потребни различни хардверски контролни решенија. За таа цел, при изградба на системот за активна контрола на акустична средина ќе биде креиран софтверски модел со употреба на адаптивните алгоритми [31] со цел да се определат параметрите кои влијаат врз ефикасноста на активните системи [32].

Согласно многубројните светски актуелни истражувања, системите за активна контрола претставуваат мотивација за истражување и анализа на нивните карактеристики преку нивна експериментална реализација [33]. Концептот за активна контрола на звукот неодамна доби големо внимание и е идентификуван како витален метод за елиминирање на звукот поради неговите предности во споредба со класичните методи со иста намена.

1.2. ПРЕГЛЕД НА ПРЕТХОДНИ ИСТРАЖУВАЊА

Контролата на бучавата подразбира мноштво на методи, техники и технологии чија цел е обезбедување на прифатливи нивоа на бучава на определено затворено место или во животната средина, согласно економските, оперативните и техничките аспекти [34]. Контролата на бучавата не го третира исклучиво директното намалување на емисиите на бучава на локацијата на изворот, туку се однесува и на обезбедување на прифатливи нивоа на бучава на имисија, односно нивото на звук кое стигнува до приемникот [35]. Како и за повеќето еколошки аспекти, можните мерки во однос на намалување на бучавата мора да се анализираат со цел прво да се подобрат карактеристиките на изворот на бучава, односно да се намалат неговите емисии. Понатаму е потребно да се проучат можностите за делување на патот на пропација на звукот, како и преземањето мерки за заштита на потенцијално погодените приемници кое се смета како крајна опција за контрола на бучавата [36].

Решенијата кои се опфатени со цел контрола на бучавата можат генерално да се поделат на пасивни и активни (Слика 1.1). Пасивната контрола е најчесто применувано решение и има за цел да го намали вишокот на акустична енергија кој се создава од изворот преку апсорпција, трансмисија или дифузија на звучниот бран. Од друга страна, активната контрола на бучавата, подразбира додавање на акустичен сигнал на примарниот извор на бучава со цел создавање на деструктивна интерференција на брановите, преку што се обезбедува директна контрола на изворниот звучен сигнал [37], [38].



Слика 1-1: Методи за контрола на непосакуван звук

Во ова поглавје ќе биде презентирани преглед на досегашните научни истражувања во областа на пасивните и активните техники за контрола на бучавата, со кој се обрнува внимание на нивниот развој и примена.

1.2.1. Методи за контрола на бучавата со користење на техниките за пасивна контрола

Пасивната контрола на бучавата вклучува широк спектар на техники кои имаат за цел да ја намалат емисијата на звучното ниво од изворите на бучава. Во зависност од изворот и локацијата на имплементација на пасивната контрола, постојат мноштво на применливи контролни мерки кои може да се земат предвид. Врз основа на ова, генерално, пасивните методи за контрола на бучавата може да се поделат на три категории, а тоа се контрола на изворот на звукот, контрола на патеката на пропација на звучниот бран и контрола на местото на приемникот [39].

Согласно Светската Здравствена Организација (СЗО), зголемената бучава во животната средина, со акцент на сообраќајната, може да предизвика ефекти кои можат да имаат сериозни импликации врз човечкото здравје [40]. Според регулативата ISO 362

[41], намалувањето на дозволените граници на сообраќајната бучава доведува до фактот дека е потребно континуирано разработување на нови ефикасни решенија во тековните истражувања за справување со бучавата од сообраќајот [42]. Контролата на сообраќајна бучава ја третира бучавата од сообраќајот, која се генерира од три доминантни извори: акустични емисии од моторот (главен извор на бучава на мали брзини), бучавата од контактот на гумите со коловозот (која е доминантна од 60 до 100 [km/h]) и аеродинамичен шум (кој е позначен при големи брзини (поголеми од 100 [km/h])).

Еден од критичните аспекти во развојот на високо ефикасни мотори со ниски емисии на бучава е контрола на бучавата од моторите со внатрешно согорување која е 40% од вкупната бучава на моторите [40]. Бучавата што се емитува од моторите со внатрешно согорување е резултат на процесите на проток на воздух во моторот (аеродинамичен шум), од механичкото движење на моторот (механички шум) и од зголемувањето на притисокот поврзано со процесот на согорување на моторот (шум од согорување). Најчесто користено соодветно решение за намалување на емисиите на бучава од моторите на возилата во животната средина, но и бучавата внатре во возилото се термо-акустичните енкапсулации кои се поставуваат на самото возило или на моторот [43]. Тие мора да бидат дизајнирани земајќи ги предвид не само акустичните карактеристики, туку и вентилацијата потребна за правилно функционирање на моторот. Поради ограничувањата, експериментално утврдување на ефикасноста на овие уреди е потешко изводливо, па затоа во истражувањата интензивно се развиваат нумерички модели и симулации за оптимизација и евалуација на карактеристиките и различните параметри за дизајн на термо-акустичните енкапсулации [44-46]. Добиените експериментални резултати се користат и за избор на соодветни материјали и геометрии во зависност од параметрите на возилата и моторот за нивна имплементација, со цел добивање на што поефикасен перформанс на уредите во намалување на емисиите на бучава [47].

Од друга страна, бучавата генерирана од издувните гасови на високи температури во возилата се контролира преку инсталација на т.н. издувни лонци, кои денес се составен дел од издувниот систем на секое возило [48]. Дизајнот на издувниот лонец е доста значаен во намалување на емисијата на бучава од возилото, а се карактеризира со неговиот перформанс на пригушување претставен со факторот на загуба при пренос [49], [50], кој зависи од геометриските карактеристики на издувниот лонец и од инкорпорираните акустични апсорбирачки материјали. Според нивниот принцип на дејствување, пригушувачите можат да се класифицираат на: реактивни или рефлектирачки пригушувачи и дисипативни или отпорни пригушувачи. Принципот на работа на реактивните или рефлективни пригушувачи се заснова на генерирање на звучни рефлексии од геометриските својства на медиумот за ширење, на пример, промени во геометријата на делот [51]. Отпорните или дисипативни пригушувачи се состојат од уреди обложени со порозен акустичен апсорбирачки материјал (најчесто минерална волна или фиберглас) [52], кој е во контакт со протокот на воздух, а се најсоодветни за контрола на средните и високите фреквенции [53]. Ефектот на

геометријата, како и материјалот на издувниот лонец се испитува со користење на теоретски, нумерички и експериментални компаративни студии [54] за определување на влијанието на клучните структурни параметри врз перформансот на издувниот лонец. Истовремено, важни се и неговите карактеристики на пригушување, како и интензитетот на енергијата на звукот испуштен во надворешната средина пред и по инсталирање на издувниот лонец во различни видови на возила [55-58].

Еден од исто така важните фактори за зголемување на сообраќајната бучава е интеракцијата на гумите од возилата со површината на патот, кој е доминантен на брзини над 40 [km/h]. Оптимално решение за намалување на оваа бучава е примена на т.н. „тивки коловози“ и „акустичните тротоари“ кои имаат висок коефициент на апсорпција на звуци во опсегот на фреквенции каде што емисиите на бучава од допирот на површината на патот со гумите се доминантни [59]. Повеќе студии кои го применуваат стандардот ISO 11819-2, 2017, исто така во литературата наречен и “CPX-метод” [60], [61] се посветени на откривање на корелацијата помеѓу текстурата и материјалот на патот и контактот со гумите на возилата. Со цел наоѓање на оптимално решение [62], заклучено е дека најголемо влијание имаат брзината, температурата, средната длабочина на асфалтот, неговата текстура, како и текстурата и дебелината на гумите на возилото [63].

Сериозен проблем поврзан со зголемено ниво на бучава претставува и бучавата која се создава во каналите, а ги вклучува каналите за греење, ладење вентилација, климатизација, транспорт на гас, производство на електрична енергија и издувните канали на машините за течност од сите типови и големини во возилата за површински и воздушен транспорт, како и многу други индустрии. Традиционални методи за контрола на преносот на звучната енергија низ и надвор од спроводните канали е преку додавање на пригушувачи или резонатори кои својата функција на пригушување на бучавата која се генерира ја вршат преку нивно обложување со различни звучно апсорбирачки материјали или модификации во геометријата [64], [58].

Најраспространето решение за ублажување на бучавата произведена од континуираниот раст на сообраќајот на возилата претставуваат звучните бариери. Звучните бариери се клучен дел од патниот инфраструктурен систем при контрола и спречување на влијанието на сообраќајната бучава на населените места [65]. Тие се постојано атрактивен предмет на истражување со цел постигнување на подобри перформанси и одржливост преку оптимизација на нивниот дизајн и креирање на методи за нивна интеграција во патната инфраструктура [66]. Во однос на звучните бариери и сличните уреди за контрола со пропагација на бучавата, постојат два пакети на Европски стандарди, еден наменет за контрола на бучавата на патиштата и еден за контрола на бучавата од железничкиот сообраќај. Првиот пакет е развиен од CEN/TC226/WG6 и вклучува хармонизиран стандард (EN 14388) и збир на придружни стандарди за тестирање или пресметување на релевантните карактеристики: апсорпција на звук, звучна изолација, ефективност на додадените уреди на горниот раб од бариерата,

механичките и безбедносните карактеристики итн. [67]. Евалуацијата на ефективноста на бариерите за бучава во некои истражувачки студии се осврнува на внатрешните карактеристики на бариерите, како што се апсорпција или пренос на бучава, а во други студии, се заснова на глобалните карактеристики на факторот на загуба при инсталација на определената локација, што се дефинира како разлика во нивото на бучава пред и по поставувањето на бариерата [68], [69]. При изборот на типот на акустична бариера што треба да се изгради, не само што мора да се земат предвид акустичните перформанси, туку од големо значење е и околната инфраструктура, карактеристиките на условите на горниот слој на почвата и подземјето, можностите за интеграција, како и цената за изградба, монтажа и одржување. Од овие причини, се јавува потребата за дизајн на оптимална структура за различни ситуации [70]. Поради тешко спроведливото експериментално испитување на звучните бариери, особено на локацијата од интерес, нивниот дизајн може да биде моделиран преку нумерички симулации со цел ефикасна оптимизација, со што во голема мера се намалува потребата за физички прототипови [71].

Најчестите типови на звучни бариери се тенки паравани, насипи од земја, прегради или огради и „зелени“ завеси или „зелени“ бариери. Тенките паравани се релативно тенки конструкции за контролирање на бучавата во близина на патишта или железници. Ефектот кој тие го постигнуваат за намалување на нивото на бучава зависи од нивната висина, должина и материјали. Тенките екрани може да се градат од бетон, впивачки тули, галванизиран челик, дрво, дрвени панели, алуминиум, итн. [72]. Почвени насипи или насипите од земја се насипи кои обично се покриени со трева кои покажуваат солидни перформанси во намалувањето на бучавата. Нивните главни недостатоци се потребата од огромен простор за нивна изградба и постојано одржување [73], но кога има доволно простор и соодветни материјали за неговата изградба, тие се прилично економично решение [74].

Денес, комерцијалните бариери за бучава се изработуваат од различни материјали како што се бетон, тула, дрво и стакло со што се трошат материјални ресурси во производниот процес и се создава голема количина отпад на крајот на нивниот корисен век [75]. Во поновите години, истражувачите развија бариери направени од рециклирани елементи кои ја намалуваат употребата на нерезиклирачки материјали [76]. Со растечкиот интерес на јавноста за еколошки и естетски дизајни на бариери за бучава, денес се вложуваат поголеми напори за да се обезбедат „зелени“ бариери за бучава кои се функционални и приспособливи на околината. Тие имаат најдобар естетски резултат, но од друга страна, нивните акустични перформанси се слаби и имаат потреба од постојано одржување.

Сепак, конвенционалните бариери за бучава имаат свои недостатоци поврзани со дифракцијата на рабовите што ја намалува нивната ефикасност, рефлексивноста на звучната енергија во спротивна насока, како и намалувањето на видното поле, природната светлина и протокот на воздух во населените места кои ги заштитуваат [77].

Со цел да се избегнат овие недостатоци и да се потенцира намалувањето на бучавата, неодамнешните истражувања се придвижија кон развој на т.н. „звучни кристали“ како бариери за бучава, кои се фокусираат на интеграција и комбинација на својствата на соничните кристали со други ефекти за намалување на бучавата кои ги карактеризираат звучните бариери како што се шупливи резонатори, дрвени или рециклирани материјали и порозни обвивки [78]. Многу студии прикажуваат компаративна анализа на акустичната ефикасност на класичните и соничните кристални звучни бариери спроведена со помош на нумерички симулации и експериментални податоци, споредувајќи ги врз основа на нивната област на примена, слабеењето на нивото на бучава кое го постигнуваат, фреквентниот одговор, технологијата на производство, нивното одржување и цената на чинење [79], [80]. Истражувањата на оваа технологија во последните години овозможуваат и развој на нови метаматеријали за примена во намалување на бучавата во животната средина [64].

Контролата на бучавата на локацијата на приемникот како трета категорија се однесува на посветување на внимание кон подобрување на звучната изолација во објектите, преку градежни решенија како материјали со подобри акустични перформанси, заптивки за прозорци, специјални отвори во улога на резонатори или со поставување на двојна изолација [81]. Во последните години, акустичната квалификација на зградите доби поголема важност на меѓународно ниво, а главната стратегија за ограничување на бучавата внатре во зградите е подобрувањето на изолацијата на фасадите. Конкретно, прифатениот пристап за акустична потреба за изолација на фасадата е многу различен во различни земји, бидејќи е тесно поврзан со националните регулативи кои важат за контрола на бучавата во животната средина. Главните прашања поврзани со фасадната звучна изолација се истражуваат со посебен фокус на изборот на дескриптори и параметри, методите за евалуација и нивната повторливост и доверливост [82].

Постои уште еден начин за подобрување и справување со проблемот со зголемената бучава, а тој се состои од т.н. „маскирање“ на непожелниот звук. Иако е поблиску до активен метод за контрола на бучавата, тој се состои од додавање акустична енергија на примарниот звук. Идејата позади решенијата за маскирање се темели на маскирање на определени фреквенции преку додавање на шумови, со цел да се направи звукот неразбирлив и нејасен во соседни простории, во индустриските, деловните или станбените објекти каде е потребно да се постигне поголем ефект на намалување на звукот [83].

1.2.2. Методи за контрола на бучавата со користење на техниката за активна контрола

Во последниве години во светот, предмет на интензивно истражување се активните системи за контрола на звукот кои предизвикаа значителен интерес и претставуваат ветувачко решение за проблемот со ниско-фреквентната контрола на бучавата [84-87].

Активната контрола подразбира електро-акустичен или електро-механички систем кој го поништува примарниот звук врз основа на методот на суперпозиција на брановите, преку генерирање на звук со еднаква амплитуда, но спротивна фаза на примарниот. Принципот на активна контрола функционира на принципот на деструктивна интерференција помеѓу акустичните полиња генерирани од примарниот извор на звук преку други секундарни извори чии акустични излези може да се контролираат [88]. Од друга страна, системите за активна контрола се попрецизни и разновидни од пасивните, а нивната примена може да биде директно кај изворот, при ширење на звукот или кај приемникот.

Дизајнот на акустичен активен систем за контрола на звук кој користи микрофон и електронски управуван звучник за генерирање на поништувачки звук за првпат беше предложен во патент од Пол Луег во 1936 година [89]. Развојот на раната историја на активните системи на звук може да се најде во Елиот и Нелсон [84], Џорџ и Панда [90] и истражувањата цитирани во нив. Во 1980-тите, развојот на дигиталните сигнални процесорски чипови овозможи евтина имплементација на адаптивни алгоритми и поттикна широк развој и примена на активните системи. Континуируваниот нивен напредок вклучува развој на подобрени адаптивни алгоритми за обработка на сигнали, сензори и дигитален сигнално-процесорски хардвер кој овозможува овие посоефицирани алгоритми да се имплементираат во реално време за да се подобрат перформансите на системот. Денес, со брзата модернизација и брзиот технолошки развој на моќните и евтини процесори за обработка на дигитален сигнал, се охрабрува имплементацијата на напредни адаптивни алгоритми за да се постигне побрза конвергенција, зголемена робусност и подобрени перформанси на активните системи за контрола на звукот. Успешната примена на активната контрола на бучавата бара добро просторно и временско усогласување на примарните и секундарните извори во акустичната област со цел да се обезбеди отстранување на сигналот во временските и просторните домени [91]. Активната контрола на звукот е широко поле во кое е неопходно познавањето на различни специјализирани области како што се акустика, обработка на дигитален сигнал, адаптивни алгоритми и имплементација на дигитални процесорски единици [92], [93].

Значајно за постигнување прецизен и стабилен активен систем за контрола на звукот е добриот избор на технички спецификации на неговите компоненти (извор на звук, сензор за звук, како и процесорска единица за аквизиција и обработка на сигналот). Изворите на звук треба да обезбедат соодветен динамички опсег за да можат да ги реконструираат фреквенциите од интерес потребни за активна контрола на звукот, сензорите треба да обезбедат добра чувствителност на одредени фреквенции, а единиците на процесорот на сигналот треба да бидат способни да ја достигнат брзината на мерење и одговор, како и да поседуваат брза конвергенција. Од друга страна, изборот на контролер треба да биде таков што треба да овозможи да се додаваат поголем број на канали со додавање на модули за аквизиција на аналогни сигнали, како и голема процесорска моќ. Покрај техничките барања, друг важен аспект е изборот на

адаптивниот дигитален филтер и адаптивниот алгоритам, кои впрочем имаат директно влијание на карактеристиките на системот.

Согласно начинот на кој е изведен контролниот систем, активната контрола на звукот може да биде постигната преку контрола со директна врска, каде што преку примарниот сензор се мери кохерентен референтен влезен звучен сигнал пред да се генерира спротивниот звук од секундарниот извор, или контрола со повратна врска [94], [95], каде што активниот систем се обидува да го поништи примарниот звук без користење на референтен измерен сигнал на звук [96]. Овие типови може да се поделат на адаптивни и неадаптивни, аналогни и дигитални, како и контролери на фреквентен и временски домен. За контрола на сигналот кој во себе содржи енергија на ниски и високи фреквенции, може да се користат и хибридни решенија (комбинација на активни и пасивни системи за контрола). Секој од типовите на систем за активна контрола на звук има свои предности и недостатоци, во зависност од апликацијата која е наменет да ја задоволи.

Контролниот систем со директна врска има поголема примена во случаите кога времето на ширење помеѓу референтниот микрофон (примарниот сензор) и звучникот за поништување (секундарниот извор) е доволно во електрична смисла. Поради оваа причина, активната контрола првично беше наменета за звуци со ниска фреквенција бидејќи на пониски фреквенции системот има повеќе време (или поголемо растојание поради подолгите бранови должини) да го пресмета и генерира соодветниот секундарен сигнал. Целта на системот е да го минимизира сигналот за грешка измерен преку секундарниот сензор за звук, така што преостанатата разлика во вкупниот звук (збирот од примарниот и секундарниот влезен сигнал) ќе резултира во што е можно пониско звучно ниво. Структурите со контрола со директна врска се класифицираат на широкопојасна адаптивна контрола со референтен сензор и теснопојасна адаптивна контрола со директна врска со референтен сензор кој не е под влијание на контролното поле (на пример: тахометар). Од друга страна, може да се разгледуваат едноканални системи, кои понатаму може да се прошират на повеќеканални случаи [97]. Кај системите за активна контрола на акустична средина, неретко се јавува и појава на т.н. „секундарна патека“, поради враќањето на звукот од контролниот извор назад кон сензорот за примарниот звук. Поради тоа, во теоретските, но и експерименталните истражувања, голем акцент се поставува на неутрализација на оваа појава и се демонстрираат подобрувања во точноста на моделирањето и зголемување на перформансите на системот [98], [99], [96].

Контролниот систем со повратна врска е поедноставен од системот со директна врска, но може да се примени само ако сигналот што треба да се контролира е добро познат и многу стабилен, односно со многу малку варијации. Така, се избегнува потребата да се измери и познава сигналот што треба да се контролира во секое време, и системот зависи само од активниот извор на звук, адаптивниот контролер и секундарниот сензор за звук или микрофон. При контролата со повратна врска се користи еден сензор за звук како

сензор за „грешка“, кој го регистрира збирниот сигнал што треба да се поништи. Информациите се испраќаат до поедноставен контролен систем, кој го испраќа сигналот што треба да се генерира до изворот на секундарен звук со цел да се минимизира грешката помеѓу тековниот сигнал и претходно дефинираниот [100], [101]. Важно е да се напомене дека фреквентниот ранг на звук кој може да се контролира со контролата со повратна врска е прилично ограничен и затоа многу малку истражувања разгледуваат широкопојасен стохастичен звук. Контролната структура со повратна врска овозможува значително помала цена на имплементација. Како еден од недостатоците на активниот систем за контрола со повратна врска е забележан ефектот на „воден кревет“, значејќи дека ако системот успева да го поништи звукот на определени фреквенции, тогаш може да се очекува тој да биде зголемен на некои други фреквенции [102].

Со оглед на тоа што карактеристиките на изворот на звукот и околината се променливи во времето, содржината на фреквенцијата, амплитудата, фазата и брзината на звукот на несаканиот шум се нестационарни [103]. Затоа, активниот систем за контрола на звукот мора да биде приспособлив, односно адаптивен за да се справи со овие варијации. Адаптивните филтри како дел од системот ги прилагодуваат нивните коефициенти со цел намалување на разликата во сигналот на грешка и може да бидат реализирани како трансверзални конечни филтри со импулсен одговор (FIR), рекурзивни бесконечни филтри со импулсен одговор (IIR), итн. [104-110]. Во овој случај, пожелно е поништувачот на звукот да биде дигитален, каде сигналите од електро-акустичните или електро-механичките сензори се семплираат и процесираат во реално време со користење на дигитални процесирачки единици [111].

Адаптивните алгоритми овозможуваат да се постигнат добри перформанси дури и кога информациите за сигналот што треба да се обработи се нецелосни. Контролерите можат да применат многу можни адаптивни алгоритми [94]. Најчесто користена форма на адаптивен филтер е трансверзалниот филтер кој го користи алгоритмот на најмали средни квадрати (Least-mean-square (LMS)) и филтрираниот алгоритам на најмали средни квадрати (Filtered-x least-mean-square (FxLMS)) како напредна варијанта на LMS алгоритмот [95]. Директната употреба на адаптивни филтри во фреквентен домен за системите за активна контрола на звукот резултира со два вида временски одложувања: доцнење во патеката на сигналот и доцнење во прилагодувањето на тежинските коефициенти. Сепак, најсовремените FxLMS алгоритми во фреквентен домен го решаваат само едниот вид на доцнење, а некои од овие алгоритми имаат многу висока сложеност и затоа се непрактични за системите во реално време, па истражувањата се стремат кон подобрување на овие недостатоци [91]. Алгоритмите базирани на FxLMS имаат ниска пресметковна сложеност за линеарни активни системи. Овој алгоритам претставува основа за развој на многу други алгоритми и може да се користи како во системите со повратна врска, така и во оние со директна врска и хибридниот системски структури.

Хибридниот контрола се однесува на контролер со два степени на слобода, кој овозможува робусни перформанси во поголем опсег на фреквенции и комбинирање на

предностите на двете структури. Во текот на изминатата деценија, многу истражувања беа посветени на користење на хибридниот модел на активни системи за контрола на звукот [112-124]. Во [125], предложени се препораки за избор на тип на активен систем за контрола кој го анализира максималното достигнувано ниво на слабеење на звукот при сите три типови на структури. Вредно е да се напомене дека како резултат на намалувањето на нивото на звукот во определена точка со користење на овие системи, околу неа се создава просторна „тивка зона“. Сепак, зоните од интерес не се повеќе од конечен број на дискретни точки, што доведува до ограничување во креирањето на три-димензионални тивки зони [126].

Од друга страна, аудио сигналите кои се обработуваат во системите неизбежно се подложни на непосакуван шум што значително влијае на квалитетот на сигналот и на севкупните перформанси на сигналните комуникациски системи. Активната контрола на шумот кај сигналите е имплементирана во многу практични апликации каде што саканите сигнали треба да се изолираат од шум и изобличување како што се обработката на аудио сигнал, мобилната комуникација, системите за препознавање говор, обработка на слики, обработка на медицински сигнали, радарите, сонарите итн. [127].

Различни искуства и прегледи поврзани со активната контрола на шумот со користење на адаптивната обработка на сигналот се елаборирани од многу автори. Имено, во истражувањето [128], научниците претставуваат студија за компаративна анализа помеѓу три временски променливи алгоритми во онлајн и офлајн режим на работа на системот, моделирани во развојната околина LabVIEW. Со цел да се анализира и да се испита сложеното моделирање и програмирање на различни адаптивни алгоритми и адаптивни филтри, во [129] се дизајнирани адаптивни филтри базирани на алгоритмот на најмали средни квадрати (LMS) и алгоритмот на рекурзивни најмали квадрати (Recursive-least-squares (RLS)) користејќи го повторно LabVIEW. Во [130] е опишано и демонстрирано адаптивно поништување на шумот со користење на говорни сигнали во реално време во LabVIEW, додека во [131], дискутираниот дизајн на адаптивниот филтер се базира на истите два алгоритми и е претставена споредба врз основа на нивната изведба. Во [132] е прикажан дизајн на LMS алгоритам, нормализиран алгоритам на најмали средни квадрати (Normalized-least-mean-squares (NLMS)), алгоритам со најмал среден квадрат со знак (Sign-least-mean-squares (SLMS)) и алгоритам со променлива големина на чекор (Variable-step-size (VSS)). Анализата претставена во трудот [133] се занимава со апликацијата за обработка на говорни сигнали со употреба на адаптивна филтрација во LabVIEW која обезбедува валидација на адаптивните алгоритми за потребите на обработката на говорот. Од друга страна, истражувачите во [134] предлагаат архитектура за реализација на адаптивниот алгоритам на LMS во LabVIEW преку хардверска имплементација со цел да се анализираат перформансите на адаптивниот филтер во однос на перформансите на конвергенција, односот помеѓу сигналот и шумот на филтриран сигнал, должина на филтерот и способноста за брзината на одговор на системот. Согласно повеќето компаративни проценки во прикажаниот

преглед на литературата [135], најраспространета графичка програмска средина за дизајнирање на дигитални процесорски единици и адаптивни филтри со примена во системите за активна контрола е софтверскиот пакет со алатки LabVIEW. LabVIEW овозможува прилагодување на анализата и обработката на сигналот за различни типови на адаптивно филтрирање и примена на адаптивни алгоритми што го прави најоптимално решение за експериментален развој на системите за активна контрола на звукот [136].

Кога системите за активна контрола на звук се применуваат во реални апликации, се појавуваат многу практични проблеми на кои треба да се обрне внимание и да се лоцира нивното потекло. Анализата на перформансите на еден ваков систем вклучува неколку параметри меѓу кои се: фундаменталните физички ограничувања во перформансите, практичните ограничувања во перформансите, баланс помеѓу перформансите и сложеноста на проблемот и определување на техничките услови на практичниот дизајн. Со цел ваквите системи да бидат погодни за индустриска примена, тие мора да задоволуваат определени карактеристики како што се: максималната ефикасност на поголем фреквентен опсег со можност за поништување на поголем ранг на звучни фреквенции, автономност во однос на инсталацијата, така што системот ќе може да биде изграден и поставен во индустриски услови, прилагодливост на системот со цел да може да се справи со сите варијации на физичките параметри (температура, воздушен притисок итн.), робусност и доверливост на различните елементи на системот, како и поедноставување на контролната електроника.

Денешните апликации на системите за активна контрола на звукот се изведуваат како симулации или како реални системи [137], кои може да бидат класифицирани во неколку подрачја кои тие ги опфаќаат. Најширока примена имаат во автомобилскиот сектор за намалување на бучавата произведена од издувните системи и од самиот мотор, за намалување на бучавата внатре во автомобилите со цел зголемување на комфорот на патниците [138-142] и за намалување на бучавата која се испушта во надворешната средина [143-145]. Понатаму, системите за активна контрола на звукот се често применувани во домашни услови, за намалување на бучавата кој доаѓа од каналите на системите за климатизација, фрижидерите, кујнските апарати, вентилацијата, машините за перење, уредите за чистење и слични апарати во домаќинството. Исто така, системите за активна контрола се потенцијална техника за апликација во станбените објекти за изолација на истите од надворешна бучава, најчесто преку нивна интеграција во прозорци и врати [89,146,147]. Исто така, тие наоѓаат голема примена во индустриски уреди како вентилатори, трансформатори, компресори, пумпи, турбини и други уреди кои се карактеризираат со големо производство на бучава и значително влијаат на чувството и работоспособноста на луѓето во работната средина, но и во пошироко просторно подрачје како населено место [148-150]. Комерцијална примена на системите која е во голем подем, а е веќе сериозно развиена и наиде на голем интерес е во слушалките за активно поништување на непосакувани звуци. Преку интегрираниот мини

систем за активна контрола на звук, тие го поништуваат надворешниот непосакуван звук со цел зголемување на квалитетот на звукот што доаѓа до увото на слушателот и издвојување на посакуваните од непосакуваните звуци [151], [152]. Денес, активните системи за контрола на акустична средина се применуваат и во транспортните системи за контрола на бучавата во воздухопловните летала како што се авионите, хеликоптерите и воднопловните возила [153].

1.3. ЦЕЛИ НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

За реализирање на целите на оваа докторска дисертација ќе бидат спроведени детални теоретски и експериментални истражувања. Основната цел на оваа докторска дисертација е изградба на физички експериментален модел на систем за активна контрола на ниско-фреквентна акустична средина. Физичкиот дел од системот ќе се состои од примарен и секундарен извор на звук и референтен мерен сензор за звук, кои ќе бидат влезни и излезни сигнали во аквизициониот модул, како и модулот за контрола на податоците во реално време. Софтверското моделирање на системот ќе обезбеди контрола и обработка на овие сигнали, како и визуелизација на резултатите. Клучен фактор во софтверското моделирање ќе биде примената на адаптивните алгоритми во управувањето со моделот, со цел да се анализира влијанието на истите врз перформансите на активниот систем.

Современите технологии за креирање на систем за активна контрола на звукот се применуваат со цел развој на систем кој успешно ќе се справи со ниско-фреквентниот звук. Ова истражување ќе даде осврт кон теоретското и експерименталното моделирање за развој на системите за активна контрола на ниско-фреквентниот звук, со посебен акцент на анализата и примената на адаптивните алгоритми за контрола на сигналите, дигиталната обработка на сигналите и процесорските единици за контрола на сигналите. Преку анализа и примена на адаптивни алгоритми, целта е да се избере соодветен алгоритам за моделирање на секундарниот звук со цел отстранување на ниско-фреквентниот звук од примарниот извор. Анализата на овие алгоритми ќе овозможи анализа на времето на одговор и стабилноста на активниот систем, како и нивната можност и ефикасност за постигнување на „тивка зона“ во определениот еднодимензионален акустичен простор.

Од друга страна, како дел од експерименталната анализа, ќе се спроведе детално истражување на компонентите од системот како што се актуаторите и сензорите со цел да се обезбеди увид и анализа на перформансите на активниот систем во зависност од користените инструменти и модули. Анализата на перформансите на модулите за контрола во реално време ќе овозможи експериментален пристап кон продлабочени знаења во областа на процесирање на звучните сигнали и анализа на карактеристиките на системот во зависност од аквизиционите единици.

Теоретските анализи на адаптивната контрола преку употреба на адаптивни алгоритми ќе бидат потврдени преку експерименталниот физички модел на активниот систем со сите компоненти со цел да се изврши верификација на применетата методологија и пристап. Системот за активна контрола на акустичниот звук ќе најде своја примена за понатамошни научно истражувачки и практични цели со цел напредок и развој во областа на акустиката.

1.4. ХИПОТЕЗИ

Главна хипотеза: Примената на адаптивните алгоритми кај системите за активна контрола на звукот може да послужи за намалување на звучното ниво на акустичната зона.

Придружна хипотеза: Карактеристиките на адаптивни алгоритми може да влијаат врз степенот на намалување на звучното ниво при примена во системите за активна контрола на звукот во акустична зона.

1.5. МЕТОДОЛОГИЈА НА ИСТРАЖУВАЊЕТО

Методологијата за изработка на докторската дисертација ќе биде спроведена во насока на ефикасно и квалитетно реализирање на целите на истражувањето, а истата е дефинирана на следниот начин:

- Преглед на литература во областа на бучавата преку анализа на досегашни истражувања, Европски стандарди и националните регулативи.
- Преглед на досегашните достигнувања во областа на справување со бучавата.
- Преглед на методите за контрола на бучавата преку анализа на пасивната контрола на бучава од една страна и активната контрола на бучавата од друга страна.
- Аналитичко моделирање и симулација на активна контрола на звук.
- Дефинирање на физичките услови и технички барања потребни за обезбедување на систем за активна контрола на акустична средина преку анализа на потребните хардверски и софтверски компоненти за изведба.
- Поставување на мерен систем и експериментално моделирање.
- Креирање на софтверски модел за обработка и анализа на звучните сигнали.
- Анализа и оцена на влијанието на адаптивните алгоритми врз однесувањето на системот.
- Анализа и оцена на однесувањето на системот при различни физички карактеристики на акустичната средина.
- Оптимизација на системот преку менување на физичките услови и карактеристиките на акустичната средина, како и карактеристиките на адаптивните

алгоритми во моделот со цел да се обезбеди највисока ефикасност, односно најголемо намалување на звучното ниво во системот.

1.6. ПРИДОБИВКИ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО

Потребата од наоѓање начин за справување со ниско-фреквентната бучава како голем фактор кој влијае на генералната состојба со бучавата во урбанизираните животни средини ја наметнува потребата од употреба на современите техники за креирање на системи кои активно и ажурно ќе можат да се справат со оваа појава. Активните системи како резултат на новите технологии претставуваат соодветна замена и надоградување на класичните пасивни методи за контрола и намалување на бучавата кои поради своите недостатоци се сè помалку корисни и применливи.

Истражувањето во оваа докторска дисертација, преку теоретски и експериментален дел ќе допринесе во примена на активните адаптивни системи за контрола на акустична средина, со осврт кон реализација на активна контрола на ниско-фреквентната акустична бучава. Развојот и примената на ваквите системи бара продлабочено знаење и теоретски анализи од областа на адаптивната контрола, дигиталното процесирање и обработка на сигналите, познавање на хардверските решенија за аквизиција и обработка на податоци, како и софтверските можности за моделирање, визуелизација и контрола на сигналите. Исто така, изградбата на ваков систем мора да даде осврт кон изборот и карактеристиките на неговите компоненти од аспект на влијанието на елементите кои го сочинуваат врз перформансите на истиот.

Спроведените теоретски анализи на адаптивната контрола како клучен дел од системот за активна контрола на звукот ќе даде увид во влијанието на адаптивните алгоритми и нивните параметри врз експерименталното моделирање на системот. Од друга страна, експерименталното моделирање преку изградба на систем за активна контрола на акустична средина претставува нова техника во подем и голем потенцијал за примена во многу современи апликации. Преку изградбата на експериментален физички модел на систем, ќе бидат анализирани физичките услови под кои може да се разгледува степенот на ефикасност и параметрите кои влијаат врз успешноста на системот за активна контрола, како и методот на аквизиција на сигналите и нивното процесирање. Со помош на софтверското моделирање бидат утврдени перформансите на адаптивните алгоритми во ваква примена, како и потребната обработка на сигналите со цел обезбедување на соодветни услови за ефективна реализација на системот.

Изведбата на системите за активна контрола на акустична средина и обезбедување на „тивка зона“ претставува современ технолошки пристап кон справување со проблемот на контрола на акустичната ниско-фреквентна бучава кој е финансиски поисплатлив, полесен за изведба и поефикасен од стандардните методи за справување со бучавата во современото урбанизирано општествено живеење. Примената на ваков систем може да обезбеди замена на класичните пасивни методи на справување со бучавата кои се скапи,

големи и непрактични за примена во голем број на апликации каде има потреба од намалување на непожелниот звук. Од оваа причина, системите за активна контрола на звукот се актуелно поле на интерес за истражување во последните години, а со новите можности и технолошки напредоци стануваат сè попростапни и нивната имплементација станува неопходна. Придобивката од ова истражување ќе биде систем кој ќе ги дефинира предностите, но и предизвиците за реализација на систем за активна контрола на акустична средина.

2

АНАЛИЗА НА СТАНДАРДНИ МЕТОДИ ЗА КОНТРОЛА НА БУЧАВАТА ВО ЖИВОТНАТА СРЕДИНА

Во последните години, поради зголемената урбанизација и пренаселеност на градовите, бројот на луѓе изложени на високи нивоа на бучава ширум светот драстично се зголеми. Меѓу многуте фактори кои го зголемуваат нивото на бучава, еден од највлијателните е бучавата од сообраќајот. Сообраќајот на патиштата е доминантен извор на бучава во урбаните средини и претставува втор најважен фактор на ризик за здравјето по загадувањето на воздухот [154]. Се проценува дека во Европа, околу 20% од вкупното население е изложено на нивоа на бучава од патниот сообраќај кои се сметаат за штетни за здравјето [155]. Европската унија, преку Директивата 2002/49/ЕС [154], има воспоставено основи кои бараат креирање на мапи за бучава на градовите поголеми од 250.000 жители и патиштата со над 6 милиони автомобили годишно како метод за предиктивно определување на дисперзијата на бучавата. Овој метод е широко прифатен во европските земји во насока на подготовка на акциони планови за воспоставување на мерки за проценка и контрола на бучавата што се емитува од главните извори, како што е сообраќајната бучава. Имено, техниките за мапирање на бучавата заедно со корелираните стандарди, вклучуваат креирање мапи за бучава врз основа на податоци за густината на сообраќајот, во комбинација со физички и реални мерења на нивото на бучава со цел симулирање и верификација на состојбата со сообраќајната бучава во градовите [155].

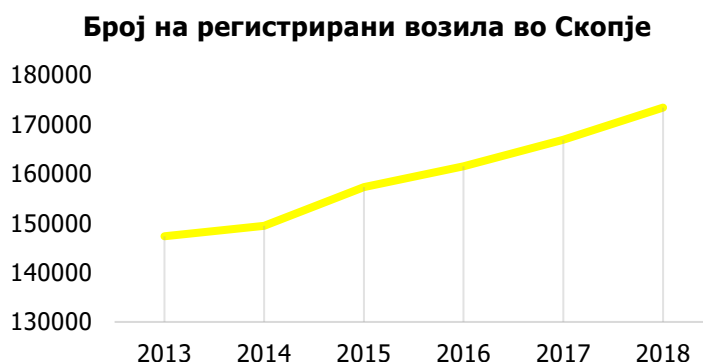
Вообичаена стратегија за анализа на протокот на сообраќајот и креирање на мапа за предвидување на сообраќајната бучава е собирање информации за протокот на сообраќај за одредена област нормиран во временски периоди на локацијата од интерес [156]. Ова може да се спроведе преку мануелни мерења на бројот на возила на одредена сообраќајница или, со добивање на информации за протокот на сообраќај од одговорните институции [4]. Со цел да се изврши моделирање и симулација на сообраќајната бучава и пресметка на дисперзивниот модел, може да се користат различни софтвери за пресметување на бучавата (CadnaA, IMMI, SoundPlan, итн.).

Понатаму, потребно е да се идентификува индикаторот L_{den} (еквивалентно ниво на ден-вечер-ноќ) [157] кој претставува основен опишен параметар за бучава кој се смета за индикатор за „вознемиреност“. Еквивалентното ниво на звук (L_{eq}) од протокот на сообраќај зависи од три специфични променливи: просечната брзина на сообраќајницата, висината на објектите кои се наоѓаат околу сообраќајницата, како и материјалот од кој е направен патот. Овие три параметри треба да се земат во предвид како влез во софтвер за симулација при креирање на мапата на бучава. Така креираниот предиктивен модел за избраната област, кој како влезен параметар ја користи статистиката за бројот на возила нормирани во единица време за избраната сообраќајница, претставува визуелна репрезентација за дисперзија на бучавата предизвикана од протокот на сообраќај. Проблемот со ваквата имплементација на овој метод е што информациите за сообраќајните податоци можеби не се секогаш квантитативно (број на возила на час) и квалитативно (типови возила, временска репрезентативност и точност) прецизни, а и често се недостапни за сите сообраќајници во градот [158]. Во такви случаи, софтверот ја пресметува дисперзијата на звукот врз основа на дадениот неточен или недоволен влез, што може да резултира со погрешни вредности за индикаторите. Затоа, во согласност со препораките на EU WG3 [159], треба да се спроведат серија на реални физички мерења со цел да се потврдат резултатите од предиктивните мапи за сообраќајна бучава [160].

2.1. ВЛИЈАНИЕ НА СООБРАЌАЈНАТА БУЧАВА ВО ВКУПНОТО НИВО НА БУЧАВА ВО ЖИВОТНАТА СРЕДИНА

Неодамна, интензивните промени во инфраструктурата, зголемувањето на густината на станбените, како и деловните и индустриските објекти, а како последица на тоа и зголемената фреквенција на луѓе во Скопје, главниот град на Северна Македонија, предизвикаа зголемување на обемот на сообраќај и бучавата предизвикана од него. Многу возила формираат долги колони што резултира со метеж на улиците кои често ја надминуваат дозволената граница за бучава во текот на денот и ноќта. Според изјавите на жителите, во ноќните часови главно на булеварите се слушаат гласни и иритирачки звуци на мотори и автомобили кои се движат со брзина поголема од дозволената, што придонесува за јачината и времетраењето на бучавата. Релевантен индикатор за ова се последните достапни информации на Државниот завод за статистика, во период од пет

години, од 2013 до 2018 година, бројот на регистрирани возила во градот пораснал за 15 % (Слика 2-1).

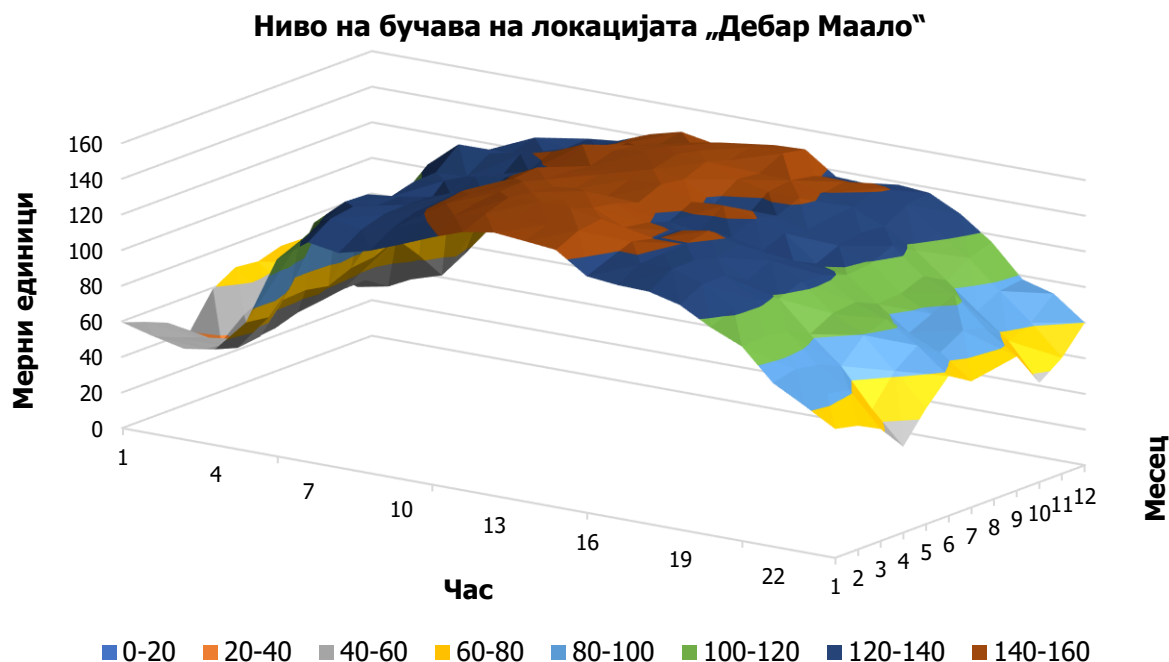


Слика 2-1: Последни статистики за бројот на регистрирани возила во тек на 5 години согласно Државниот завод за статистика

Со цел да се добие увид во состојбата со зголеменото ниво на бучава во еден дел од градот Скопје, спроведена е методологија за проценка на нивоата на бучава на избрани мерни локации која е опишана подолу.

2.1.1. Избор на мерна локација

Неодамна, софтверската компанија Netcetera лоцирана во градот Скопје имплементира нискобуџетна сензорска мрежа низ градот со која се мерат некои динамички еколошки параметри како што се загадувањето на воздухот, температурата и влажноста, и нивото на бучава. Собраните податоци од сензорите се поставени на онлајн платформата `Skopje@pulse.eco` која е достапна за јавноста, прикажувајќи го нивото на бучава на 21 точка низ градот. Поради малата прецизност и високата мерна несигурност на нискобуџетните сензори, добиените податоци не можат да се користат за спроведување на постапката за стратешко мапирање на бучавата. Оваа платформа се користи за да се анализира трендот на промени на загадувањето од бучава во текот на 24 часа на секоја 21 локација низ градот истовремено, а добиените информации од сензорите се користат како индикатор за откривање на областите во градот кои се најекспонирани на зголемено ниво на бучава. Поради неточноста на сензорите, вредностите од податоците од сензорите не се искористени за подлабоки анализи, туку во предвид се зема споредбата на промената на нивото на бучава во сите мерни точки.



Слика 2-2: Месечно и дневно ниво на бучава на локацијата „Дебар Маало“

По подолг период на следење и анализа на овие податоци, констатирано е дека најголемата вредност на бучавата е означена на мерното место кое се наоѓа во населбата „Дебар Маало“ (Слика 2-2). Населбата „Дебар Маало“, со оглед на нејзините 10.000 жители распространети на површина од 0,4 [km²], се граничи со четири главни булевари во градот: Партизански одреди, Климент Охридски, Илинден и Рузвелт (Слика 2-3). На оваа локација во градот, освен големиот број на угостителски објекти во непосредна близина на станбените згради кои работат до доцните ноќни часови, постои и зголемена фреквенција на сообраќајот поради главните булевари и другите сообраќајници во внатрешниот дел на околината.



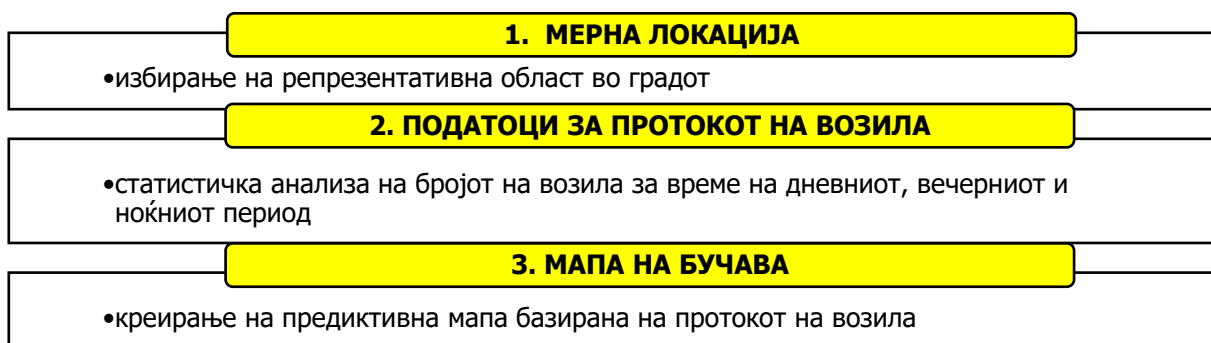
1. Булевар „Франклин Рузвелт“
2. Булевар „Илинден“
3. Булевар „Св. Климент Охридски“
4. Булевар „Партизански Одреди“

Слика 2-3: Областа „Дебар Маало“ и четирите булевари кои ја ограничуваат

Во последно време во населбата исто така се одвиваат бројни градежни активности кои дополнително ја зголемуваат бучавата и ги вознемируваат жителите. Од друга страна, покрај станбено-угостителските објекти, населбата „Дебар Маало“ содржи и објекти како основно училиште, градинка, два факултети и библиотека низ кои секојдневно циркулираат голем број на луѓе, но во исто време бараат тивка средина. Затоа, населбата „Дебар Маало“ е усвоена како репрезентативна област на градот Скопје и мерењата на бучавата во „Дебар Маало“ се земени како појдовна точка за изработка на предиктивната карта на сообраќајна бучава.

2.2. ПРОЦЕНКА НА ВЛИЈАНИЕТО НА СООБРАЌАЈНАТА БУЧАВА ПРЕКУ МЕТОДОТ НА ПРОТОК НА ВОЗИЛА

Проценката на загаденоста со бучава во сообраќајот според [154] се состои од определување на еквивалентно ниво на сообраќајна бучава на избрана локација во градот во определен временски период, врз основа на протокот на возилата на одреден дел од патиштата што резултира со визуелна презентација на мапа на бучава креирана во специјален софтвер за мапирање на бучавата.



Слика 2-4: Методологија за креирање на предиктивна мапа на сообраќајна бучава

Целта на методот за анализа на протокот на сообраќај е да се создаде предиктивна мапа на бучава врз основа на статистички податоци за бројот на возила што може да се изведат по трите главни чекори [156] дадени на Слика 2-4.

2.2.1. Проток на возила

Имајќи ја предвид сообраќајната бучава како главен фактор што влијае на зголеменото ниво на бучава во населбата „Дебар Маало“ која е избрана за репрезентативна населба во градот, извршена е анализа на сообраќајната бучава врз основа на интензитетот на протокот на возила нормализиран во времето (часови). За таа цел беа побарани статистички податоци за протокот на возилата на четирите булевари кои граничат со „Дебар Маало“. Податоците се обезбедени од Центарот за контрола и управување со сообраќајот (ЦУКС), кој е државна институција обврзана да ја следи

густината на сообраќајот низ градските сообраќајници преку мрежа на магнетни сензори поставени на секоја крстосница во градот. Обезбедените податоци вклучуваат статистички вредности за бројот на возила на час во период од 24 часа. Првенствено беше извршена анализа на протокот на сообраќај во текот на секоја сезона (пролет, лето, есен и зима) при што констатирано е дека најоптоварен со интензитет на сообраќај е зимскиот период, во споредба со другите три сезони. Имајќи ги предвид овие информации, беа истражени месецот и денот во неделата кои се најмногу изложени на секоја локација во зима, бидејќи создавањето мапа за ова сценарио дава најреални резултати за максималната изложеност на бучава. Затоа, денот кој покажал најголема фреквенција на возила во тој временски период е избран за понатамошна анализа.

Табела 2.1: Усреднет број на возила за трите периоди од избраниот ден

	Број на возила на час		
	ден (07h-19h)	вечер (19h-23h)	ноќ (23h-07h)
1 Рузвелт	1413	974	348
2 Илинден	6550	4493	2004
3 Климент Охридски	2360	978	880
4 Партизански одреди	7452	5003	3082

Потоа, податоците за бројот на возила во одбраниот одреден ден се влез во софтверот за мапирање на бучава и картата е пресметана според францускиот национален метод за пресметување на индикаторите за бучава за уличен сообраќај [NMPB Routes], кој ја класифицира еквивалентното ниво на бучава за дневниот период (од 7:00 до 19:00 часот), навечер (од 19:00 до 23:00 часот) и ноќно време (од 23:00 до 19:00 часот). Вредностите за бројот на возила за трите периоди од денот се дадени во Табела 2.1.

2.2.2. Креирање на карта на бучава

Со цел да се направи предвидлива карта на сообраќајна бучава за подрачјето „Дебар Маало“ со оглед на податоците за бројот на возила за одреден ден на четирите гранични булевари, се користи софтверот за мапирање на бучава IMMI. Овој софтверски пакет се користи за професионални и истражувачки цели и се применува за статичко мапирање и предвидување на распространетоста на бучавата во околината. За пресметките, IMMI ги зема предвид националните упатства и стандарди. Како влез за основната карта, клучна е топографијата на областа со помош на ГИС податоците обезбедени од софтверот во моделот на мапа на OpenStreet Maps.

Од друга страна, правилното внесување на изворите на звук како што е протокот на сообраќај (број на возила) за одредени улици и периоди од денот игра најважна улога за релевантноста на резултатите. Основната топографска скица на просторот се состои од линии што ги прикажуваат булеварите, патиштата и улиците кои се граничат или циркулираат во внатрешноста на областа „Дебар Маало“ и геометриски форми што ги претставуваат градбите. Овој модел на топографска карта обезбедува добра рамка за дефинирање на изворите на бучава низ областа со оглед на точните координати на

улиците и булеварите во дводимензионален систем. Во ваква карта треба да се направат дополнителни интервенции пред вметнување на изворите на бучава во смисла на дефинирање на третата димензија (висина) на објектите како дел од инфраструктурата низ целата област. Имено, за правилно пресметување на ширењето на звукот, висините на зградите рачно се вметнуваат во моделот по претходните пресметки на височините на поединечните објекти во областа. Софтверот нуди низа можности за моделирање на изворите на бучава според типот на изворот (точка или линија). Бројот на возила, просечната брзина и видовите возила ја карактеризира градската сообраќајна бучава и се бара да бидат внесени во софтверскиот модел. Во оваа карта, бројот на возила за четирите булевари што граничат со областа во трите периоди од денот (ден, вечер и ноќ) од Табела 2.1 е вметнат во посебни карти со цел да се рекреираат три различни сценарија за изложеност на бучава. Просечната брзина на сообраќајот на булеварите е 50 [km/h], а типот на возилата не е диференциран при спроведување на оваа анализа. Врз основа на овие појдовни параметри, програмата ги пресметува моделите за дисперзија на картите на бучава и добиените резултати за дневните, вечерните и ноќните сценарија изразени во L_d , L_e и L_n кои се претставени на Слика 2-5 како индикатор за еквивалентно ниво на звук. Пресметката се визуелизира со користење на протоколот на возила на четирите главни булевари моделирани во софтверот како линиски извори на бучава.



а)



б)



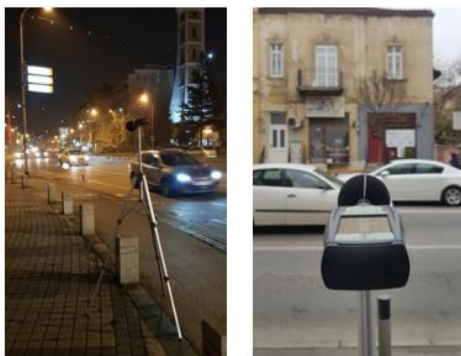
в)

Слика 2-5: Предиктивни мапи на бучава за L_{eq} креирани од податоците за „Дебар Маало“
а) дневен период (L_d), б) вечерен период (L_e), в) ноќен период (L_n)

Дадената карта на бучава означува највисоки нивоа на бучава (виолетова и црвена боја на Слика 2-5) на булеварите и околу нив, што се должи на фактот што булеварите се користат како извори на бучава. Исто така, може да се забележи дека звучното загадување достигнува највисоки нивоа во текот на денот Слика 2-5 а), кога бројот на возила е драстично поголем во однос на вечерните и ноќните периоди.

2.3. ПРОЦЕНКА НА ВЛИЈАНИЕТО НА СООБРАЌАЈНА БУЧАВА ПРЕКУ МЕТОДОТ НА ТЕМПОРАЛНО СЕМПЛИРАЊЕ

Реалните мерења на нивото на бучава на одбраната локација за претходно одредените точки во репрезентативната област се потребни не само за да се потврди моделот претпоставен со софтверската симулација, туку и за дополнување на самата проценка на загадувањето со бучава. Ова се постигнува преку локални акустични мерења со кратко времетраење или преку долгорочно следење во фиксни мерни точки. За анализа на областа „Дебар Маало“ дефинирани се четири мерни места за акустични мерења.



Слика 2-6: Локација на мерните точки во населбата „Дебар Маало“ и фотографии од мерењата

Избраните точки се наоѓаат на раскрсниците помеѓу веќе споменатите четири главни булевари кои беа моделирани во софтверот како извори на бучава. На секоја мерна точка нивото на бучава е претставено со параметарот L_{eq} во согласност со препораките објаснети во [158]. Акустичните мерења се направени со помош на мерач на нивоа на звук Bruel&Kjaer 2250 од Класа 1. Инструментот е поставен на висина од 1,5 метри во правец на извор на звук на 3,5 [m] од најекспонираната фасада (Слика 2-6).

За секоја мерна точка, акустичните мерења се вршат 3 пати во текот на денот, навечер и во ноќниот период со избирање на 10-минутен интервал за земање примероци што припаѓа во конкретниот период. Измерените вредности за еквивалентно ниво на звук во децибели [dB] се дадени во Табела 2.2.

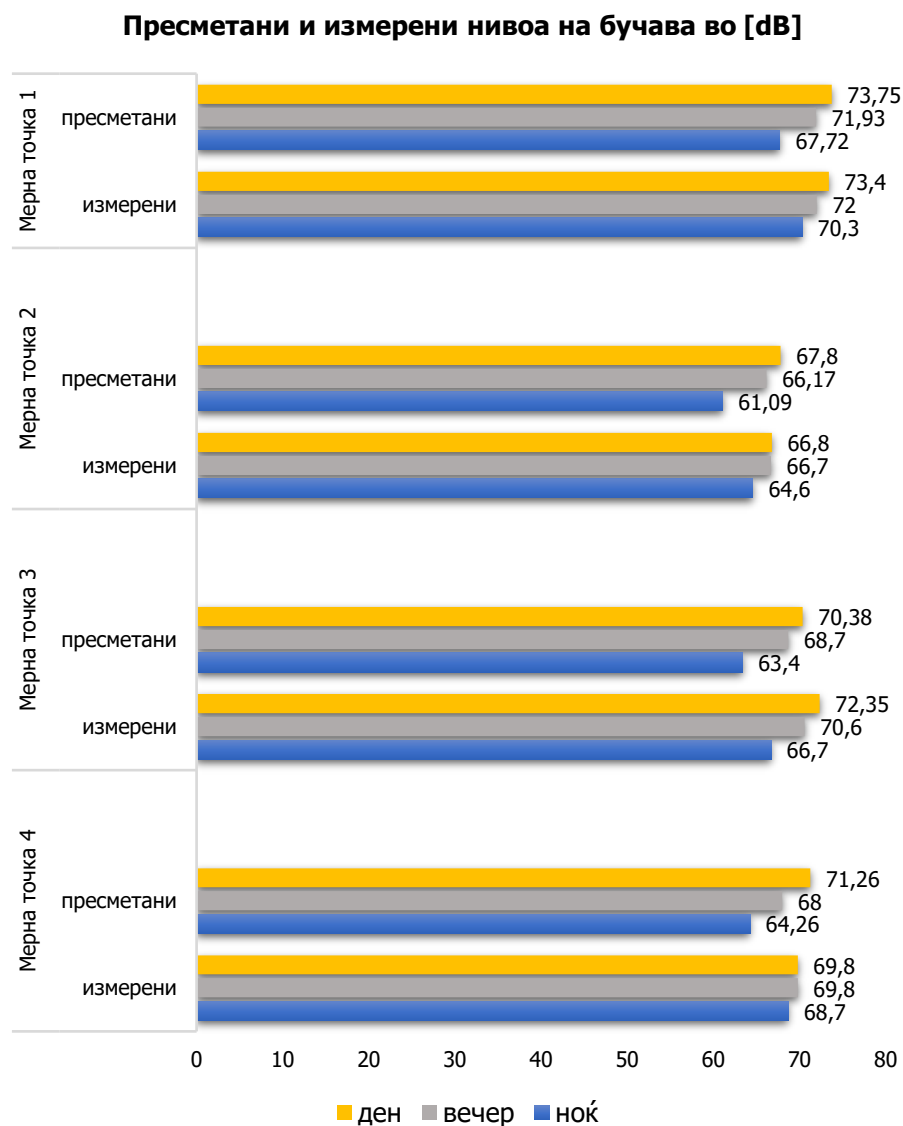
Табела 2.2: Измерени вредности за нивото на бучава на четирите крстосници

	Измерени еквивалентни нивоа на бучава во [dB]		
Мерна точка	L_d	L_e	L_n
1	73.4	72	70.3
2	66.8	66.7	64.6
3	73.6	70.6	66.7
4	69.8	69.8	68.7

2.4. КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА НА ДОБИЕНИТЕ РЕЗУЛТАТИ ОД МЕТОДИТЕ ЗА ПРОЦЕНКА НА ВЛИЈАНИЕТО НА СООБРАЌАЈНАТА БУЧАВА

Со цел да се потврдат добиените резултати, потребно е да се изврши евалуација на резултатите за да се утврдат разликите помеѓу моделираните и измерените вредности на нивото на бучава на четирите мерни точки. Променливата избрана за анализа на резултатите е континуираното еквивалентно ниво на звук (L_{eq}) што се користи како индикатор за „вознемиреност“. На Слика 2-7 се прикажани вредностите за индикаторот L_{eq} на четирите мерни точки обезбедени од двете методологии.

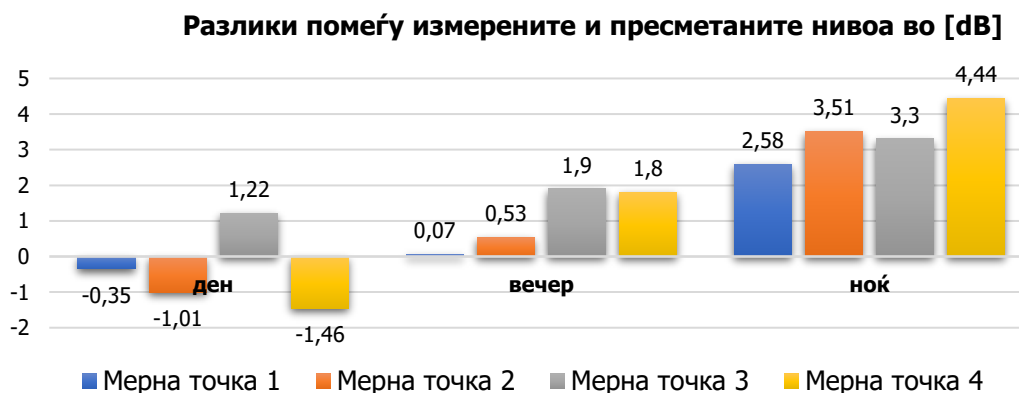
Вредностите дадени за сообраќајната бучава L_{eq} се детектираат од пресметките на картата, а измерените се читаат од мерачот на звук по спроведување на мерењата. Од Слика 2-7 може да се увиди дека резултатите дадени од двете методологии за индикаторот L_{eq} се надминати за секоја мерна точка во сите три периоди од денот со оглед на тоа што границата за L_{eq} е 60 [dB] за ден и навечер и 55 [dB] за ноќен период. Највисоката измерена вредност е 73,4 [dB] во текот на денот во мерното место 1, што може да се должи на фактот што оваа точка е најблиску до центарот на градот каде што има поголема фреквенција на сообраќај и циркулација на луѓе во текот на денот. Најниската измерена вредност е 64,6 [dB] во текот на денот во мерното место 2, но сепак е повисока од дозволените 60 [dB]. Овие надминати вредности ја потврдуваат првичната претпоставка дека областа е сериозно загадена од бучава и дека жителите се изложени на повисоко ниво на бучава од дозволеното.



Слика 2-7: L_{eq} за четирите мерни точки за сите три периоди од денот

Од друга страна, евидентно е дека нивоата на бучава за дневниот период се повисоки од вредностите за вечерниот и ноќниот период во сите четири мерни точки, што може да доведе до заклучок дека тоа може да се случи поради поголемата густина на сообраќај во текот на денот во споредба со вечерните и ноќните периоди. Сепак, ова може да наведе на погрешни заклучоци, со оглед на фактот дека вредностите прикажани на мапата за бучава во сообраќајот ја опишуваат само бучавата што доаѓа од возилата, што значи дека другите извори на бучава не се вклучени во вкупната вредност на бучавата. Поради тоа, се пресметуваат разликите помеѓу вредностите дадени од картата и измерените, што може да доведе до подобро разбирање на влијанието на другите извори

на бучава во севкупната ситуација на бучава. Разликите помеѓу измерените и вредностите дадени од картата се дадени на Слика 2-8.



Слика 2-8: Разлики во резултатите добиени од двете методологии

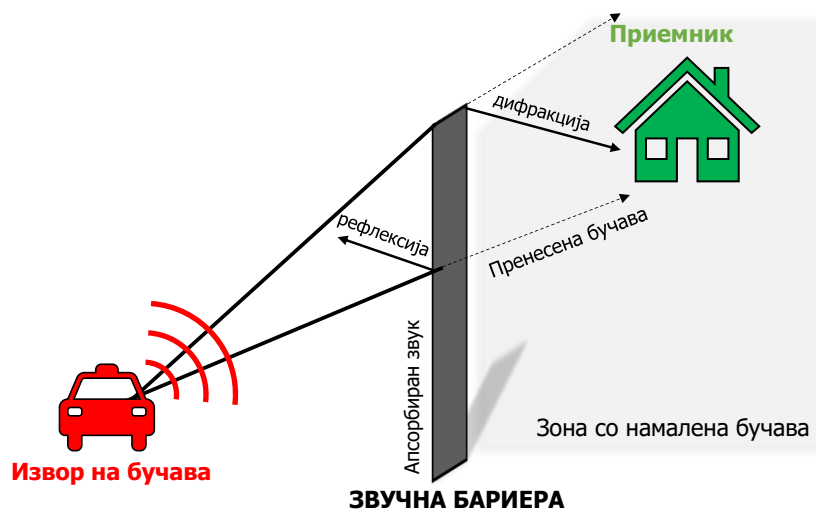
Од резултатите дадени на Слика 2-8, може да се заклучи дека разликите помеѓу измерените и симулираните вредности се помали од 2 [dB] за денот и вечерниот период од денот, а за ноќниот период разликите достигнуваат 4,4 [dB], што значи дека измерените вредности за нивоата на бучава се повисоки од оние што се отчитани од картата за бучава. Очигледната разлика во измерените и моделираните вредности за L_{eq} во текот на ноќниот период може да се појави поради влијанието на други извори на бучава во текот на ноќниот период, како што се човечки говор или музика, кои не можат да се идентификуваат од мапата за сообраќајна бучава. Од друга страна, мерната несигурност на мерачот на нивото на звук и точноста на моделот треба да се земат предвид бидејќи придонесуваат за севкупната релевантност на резултатите. Меѓутоа, валидацијата на резултатите доведува до заклучок дека главниот проблем со загадувањето од бучава на соодветната локација во текот на денот и вечерниот период претставува сообраќајната бучава, додека во текот на ноќниот период, како доминантни извори на бучава може да се сметаат извори од друг тип (гласна музика, говор на луѓе итн.).

2.5. АНАЛИЗА НА ЕФИКАСНОСТА НА ЗВУЧНИТЕ БАРИЕРИ КАКО МЕТОД ЗА ПАСИВНА КОНТРОЛА НА СООБРАЌАЈНАТА БУЧАВА

Во последните децении, воведувањето на построги закони за бучавата во животната средина резултираше со низа мерки за намалување на бучавата од различен карактер. Тие вклучуваат мерки за урбанистичко планирање како што се назначување области чувствителни на бучава, регулативи за ограничувања на брзината на возилата или ограничувања на сообраќајот, мерки за подобрување на акустичните перформанси на возилата, тротоарите и зградите, како и изградба на бариери за бучава.

Најчесто применуван метод за намалување на бучавата на сообраќајниците и автопатите е поставување на звучни бариери кои се конструираат и изведуваат надолжно на автопатот. Постојат три типови на акустични бариери, а тоа се рефлектирачки, апсорбирачки и реактивни. Апсорбирачките бариери се непроѕирни и во својата изведба содржат порозен елемент кој го апсорбира звукот како што се фибер бетоните и гранулиран бетон. Рефлектирачките бариери може да бидат непроѕирни, но и транспарентни и во својата конструкција не содржат материјал кој го апсорбира звукот (бетон, цемент, метал или дрво). Тие дејствуваат на начин што го рефлектираат звукот кој доаѓа до нив што резултира во одбиена звучна енергија на другата страна на сообраќајницата или автопатот. Реактивните бариери се непроѕирни и се конструирани така што имаат шуплини или резонатори кои се дизајнирани да апсорбираат или намалат само определени фреквенции кои влегуваат во состав на бучавата на која се изложени.

Звучните бариери претставуваат структури кои го попречуваат директното пренесување на звукот во воздухот произведен од определен извор и ја редистрибуираат звучната енергија на неколку патеки како што е прикажано на шемата на Слика 2-9.



Слика 2-9: Шематски приказ на функцијата на звучните бариери

Патеката на рефлектиран звук се формира така што звучниот бран што стигнува до изложената страна на бариерата кон сообраќајницата делумно се одразува од неа. Звучната бариера може да апсорбира и други делови од звучната енергија. Врз основа на овие акустични својства, звучните бариери обично се поделени во две главни групи: апсорптивни бариери, кои се специјално дизајнирани да апсорбираат дел од акустичната енергија и рефлектирачки бариери, од кои бучавата во голема мера се рефлектира (посебна група се состои од реактивни бариери, кои се уреди кои содржат шуплини или резонатори). Делот од звучната енергија кој стигнува до изложената страна од бариерата и се пренесува преку самата структура се нарекува пренесен звук. Целта на конструирањето и поставувањето на ефикасна звучна бариера е пренесениот звук да биде што е можно помал. Дифракционата патека пак, го ограничува врвот и краевите на

бариерата, така што бариерата делува како пречка за ширење на бучавата, ги дифрактира звучните бранови, а потоа се шири до задната страна на бариерата со помалку енергија. Дифракцијата на бучавата во голема мера е одредена од разликата помеѓу растојанието на директната патека помеѓу изворот и приемникот и должината на продолжената патека поради присуството на бариерата.

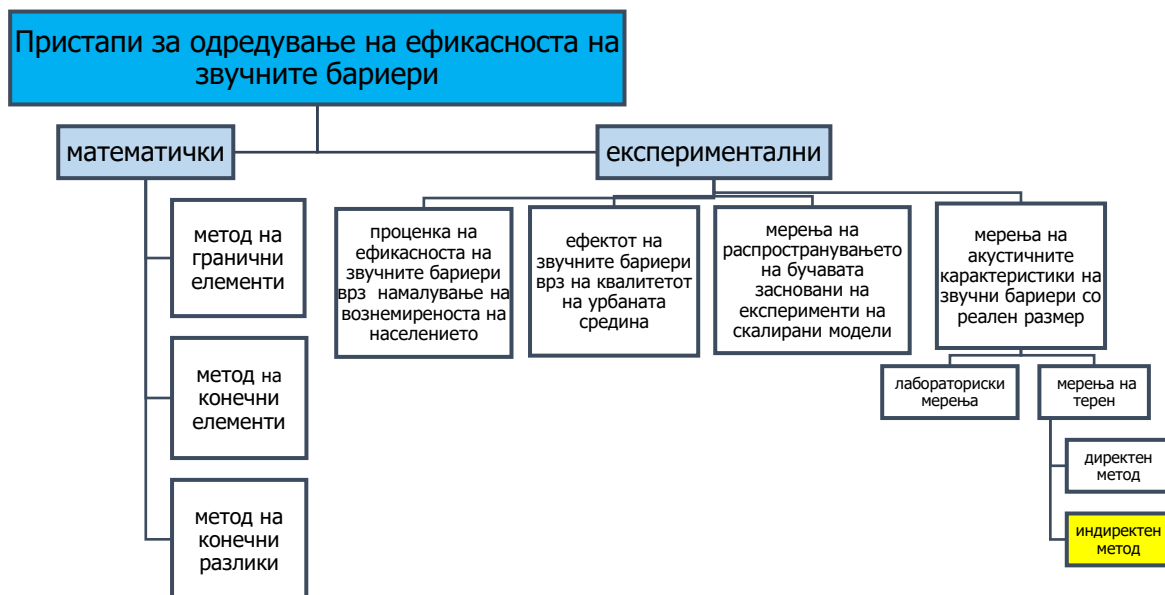
Бариерите за бучава формираат зона со намалена звучна енергија зад бариерата (исто така наречена „зона на сенка“) што е комбинација од рефлексивна, дифрактивна и загуби во преносот на звучната енергија. Поради природата на звукот, дифракцијата не ги третира сите фреквенции подеднакво. Повисоките фреквенции се дифрактираат во помал степен, додека спротивно на тоа, пониските фреквенции се дифрактирани подлабоко во „зоната на сенка“ зад бариерата. Како резултат на тоа, бариерите за бучава се смета дека генерално се поефикасни во слабеењето на повисоките фреквенции.

Акустичната изведба на бариерата за бучава зависи од збир на внатрешни и надворешни карактеристики [162]. Внатрешните карактеристики се однесуваат на својствата на поединечните компоненти на бариерата, како што се видот, дебелината и дизајнот на употребените материјали. Надворешните карактеристики го земаат предвид ефектот на бариерата откако ќе се постави. Овие карактеристики главно се одредуваат од збир на специфични услови, како што се: положбата на бариерата во однос на изворот и приемникот, нејзината ефективна висина и должина за блокирање на патеките на ширење, природата на изворот на бучава во однос на обемот на сообраќајот, брзината на сообраќајот, видовите возила и коловозот, карактеристики на медиумот за пренос на звук, т.е. услови на ветер, температура на воздухот и релативна влажност и природата на теренот помеѓу патот и приемникот, односно акустичната импеданса на површината на земјата. Овие контекстуални својства во голема мера ги одредуваат дифракционите карактеристики на бариерата и нејзиниот перформанс во намалувањето на бучавата.

2.5.1. Пристапи за одредување на ефективност на звучната бариера

Утврдувањето на ефикасноста на бариерите за бучава го привлече вниманието на истражувачите во изминатите 40 години при што беа развиени широк спектар на математички и експериментални методологии за проценка на истиот. Поделбата на пристапите за проценка на ефикасноста на звучните бариери е дадена на Слика 2-10 [163].

Експерименталните студии се засноваат на различни пристапи кои се однесуваат на проценката на ефикасноста на звучните бариери врз намалување на вознемиреноста на населението [164], ефектите на звучните бариери врз квалитетот на урбаната средина [165], мерењето на распространувањето на бучавата засновано на експериментите со скалирани модели [166] и мерењето на акустичните својства на бариери со реален размер. Мерењата на акустичните својства на бариерите се најчесто спроведуван метод и се однесуваат на анализата на ефективност на бариерите врз основа на нивните различни акустични карактеристики.



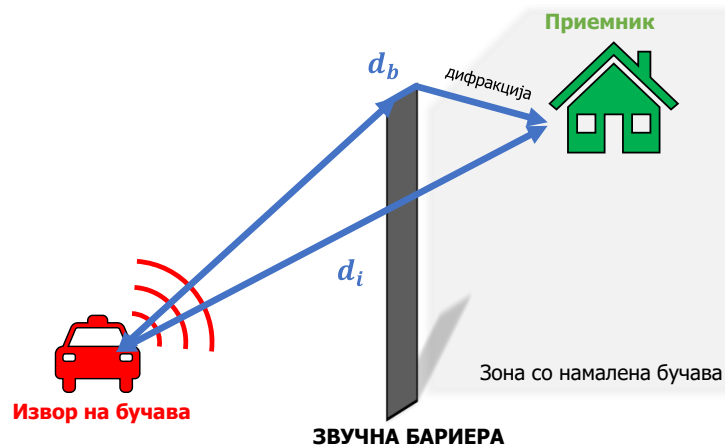
Слика 2-10: Дијаграм на пристапи за одредување на ефикасноста на звучните бариери

Многу истражувачки студии даваат осврт на внатрешните карактеристики на бариерите, како што се апсорпција на звук и изолација. Најчесто се користат два вида методи на мерење со цел проценка на овие својства: лабораториски методи со користење на дифузно звучно поле во акустични лаборатории и методи за мерење на терен.

Голем дел од досегашните истражувачки студии се засноваат на евалуација на ефективноста на бариерите за пресметка на факторот на загуба по поставување која се дефинира како разлика во нивото на бучава пред и по инсталирањето на бариерата [167]. Загубата по поставување е надворешна карактеристика на бариерите за бучава, која најмногу зависи од геометријата на локацијата, метеоролошките услови, импедансата на земјата и релативните позиции на изворот на бучава и приемникот. Овие фактори генерално не се независни еден од друг, така што вкупниот фактор на загуба не може да се пресмета со додавање на делумните парцијални фактори на загуби по поставување на бариерата.

Меѓународниот стандард ISO 10847:1997 [168] воспоставува два методи за проценка на ефикасноста на бариерата преку мерења на терен, а тоа се директниот и индиректниот метод. Директниот метод се користи кога бариерата сè уште не е инсталирана или може да се отстрани. Нивото на бучава се мери пред и по поставувањето на бариерата за да се одреди факторот на загуба по поставувањето. Во овој метод, мора да се обезбедат соодветни услови така што мерењата пред и по поставувањето на бариерата се вршат под еквивалентни временски и сообраќајни

услови. Индиректниот метод се користи кога бариерата е веќе инсталирана и не може да се отстрани. Во овој случај, проценетото ниво на бучава пред поставување на бариерата се добива со мерење на локација која се смета за еквивалентна на локацијата на мерењето.



Слика 2-11: Параметри за определување на ефикасноста на звучната бариера

Формулата за пресметка на факторот на загуба ("IL"-Insertion Loss) по поставување на бариерата согласно шемата прикажана на Слика 2-11 е дадена со:

$$IL(f) = -10 \log_{10} \left\{ \frac{|H_b(f)|}{|H_i(f)|} \cdot \frac{d_b}{d_i} \right\}^2 \quad [dB] \quad (2.1)$$

каде што:

$|H_b(f)|$ - фреквентен одговор на дифракционата компонента на импулсниот одговор

$|H_i(f)|$ - фреквентен одговор на импулсниот одговор во слободно акустично поле

d_b – најкратко растојание до изворот преку бариерата

d_i – најкратко растојание до изворот во слободно акустично поле без бариера

Во Република Северна Македонија, звучни бариери има инсталирано на повеќе локации низ државата покривајќи ги поголемите автопати. Во главниот град Скопје, поставени се звучни бариери на 2 локации, а тоа се рефлектирачка бариера кај транспортниот центар во Центарот на градот и рефлектирачки, како и реактивни бариери на Обиколницата за влез и излез од градот (Слика 2-12).

2.5.2. Имплементација на индиректен метод за проценка на перформансот на звучните бариери

Согласно ISO 10847:1997, индиректниот метод подразбира пристап кој треба да се примени кога бариерата за бучава е веќе инсталирана на определената локација и не може да биде отстранета со цел да се спроведат мерења на терен согласно директниот метод. Индиректниот метод е единствениот практичен пристап во случајот на повеќето нови патишта, каде што звучните бариери се поставени за време на изградбата на патиштата и затоа не е можно да се спроведе мерење пред поставување на звучната бариера при нормални сообраќајни услови. Овој метод беше применет за проценка на ефикасноста на две звучни бариери кои се веќе поставени во градот Скопје, со цел обезбедување на увид во степенот на заштита на бариерите од сообраќајната бучава која се покажа како доминантен извор на бучава во градот. Едната локација е звучната бариера кај Транспортниот Центар која е поставена за заштита на населба од фреквентна улица и крстосница во центарот на градот, како и железница која поминува во непосредна близина, а другата на Обиколницата надвор од градот која е поставена за заштита на населено место од бучава од автопатот (Слика 2-12).

ISO стандардот специфицира општи критериуми за мерење на ефикасноста од поставување на бариерата, вклучувајќи ги акустичните средини на мерните точки, позициите на микрофонот и условите на изворот на бучава. Во стандардот исто така, се предложени генерички принципи со цел обезбедување и одржување на доволно еквивалентни услови помеѓу мерењата „пред“ и „после“ за да се овозможи прецизно определување на факторот на загуба по инсталирањето на бариерата.

При користењето на индиректниот мерен метод, потребно е да се изберат најмалку 3 мерни точки, односно мерна точка позади бариерата, мерна точка на еквивалентна мерна локација каде што не е поставена бариера и мерна точка пред бариерата. Согласно стандардот, со цел правилен избор на соодветна еквивалентна мерна локација и определување на проценетото ниво на бучава пред инсталација на звучната бариера, потребно е да се обезбедат истите услови на средината (метеоролошки и сообраќајни услови) на двете мерни точки, онаму каде што веќе има поставено звучна бариера и каде што нема заштитна звучна бариера.

За дефинирање на овие еквивалентни локации, потребно е блиско совпаѓање во карактеристиките на емисијата, релативните позиции на изворот, бариерата и приемникот, акустичните перформанси на површината на земјата, профилот на теренот, инфраструктурата, површините што се рефлектираат и метеоролошките услови. Исто така, неопходно е да се обезбеди еквивалентност на површината на земјата, што се однесува на акустичната импеданса на земјата долж патеката на ширење извор-приемник (т.е. акустични карактеристики на почвената покривка, како што се поплочена почва, вегетација, чакал, итн.) Стандардот ISO дополнително бара околината во регионот на оддалеченост од 30 [m] зад и од страна на позициите на приемникот да биде

слична. За да се обезбеди конзистентност и релевантност на резултатите, мерењата на двете локации пожелно е да се вршат истовремено.

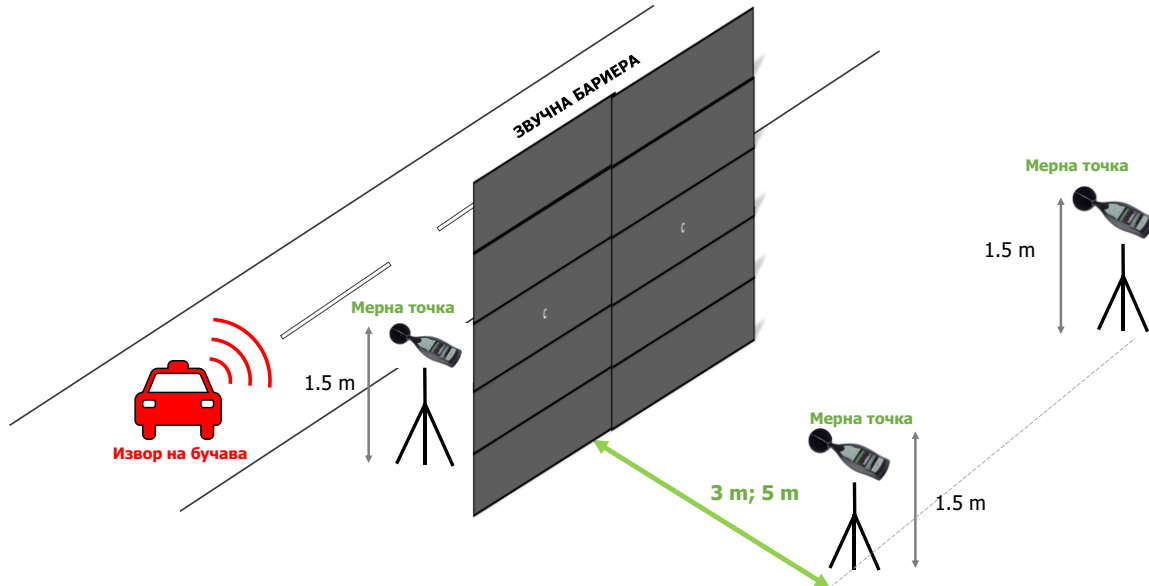


Слика 2-12: Мерни локации на звучни бариери во градот Скопје (лево: Обиколница, десно: во Центарот на градот)

Повеќето од студиите засновани на индиректни методи како извор на бучава го користат патниот сообраќај. ISO стандардот предлага природна бучава покрај патот да се користи како еквивалентност на изворот на звук за мерењата „пред“ и „после“. Употребата на сообраќајна бучава има очигледна предност што го претставува природниот извор, но и недостатокот на опишување на флукуации во обемот на сообраќајот, брзината и составот што може да влијае на точноста на резултатите. Избраните локации во градот Скопје каде се поставени звучните бариери се изложени на зголемено ниво на сообраќајна бучава, затоа индиректниот метод е соодветен пристап за определување на нивната ефикасност и проценка на степенот на контрола и заштита од сообраќајната бучава.

ISO стандардот предлага општи критериуми кои се многу општа карактеризација на отворениот простор зад бариерата, но не постои општ стандард за локациите на приемниците, односно мерните точки. Еден од клучните фактори во користењето на индиректниот метод е тоа што локациите на микрофоните во однос на изворот на бучава на позициите „пред“ и „после“ треба да бидат идентични, во однос на растојанието од патот и висината над патот. Опционална е употребата на референтен микрофон кој го зема предвид ефектот од можните флукуации на изворот на бучава, но се претпоставува дека можните флукуации во сообраќајот за време на мерењата не се очекува значително да влијаат на резултатите. Изборот на овие мерните точки во голема мера се определува со можноста за наоѓање еквивалентни локации на локацијата „пред“.

Во повеќето студии, микрофоните се поставуваат на растојанија од бариерата што одговараат на постепено удвојување на растојанието. Најчеста висина за микрофонот е 1,5 [m], иако постојат студии кои земаат предвид дополнителни висини, кои се слични или повисоки од висината на бариерата (на пр., 2, 4, 6 [m]). Растојанијата и зголемените висини на позициите на микрофонот се наменети за подобро разбирање на перформансите на зоните на дифракциона сенка (Слика 2-13).



Слика 2-13: Поставување на мерните точки

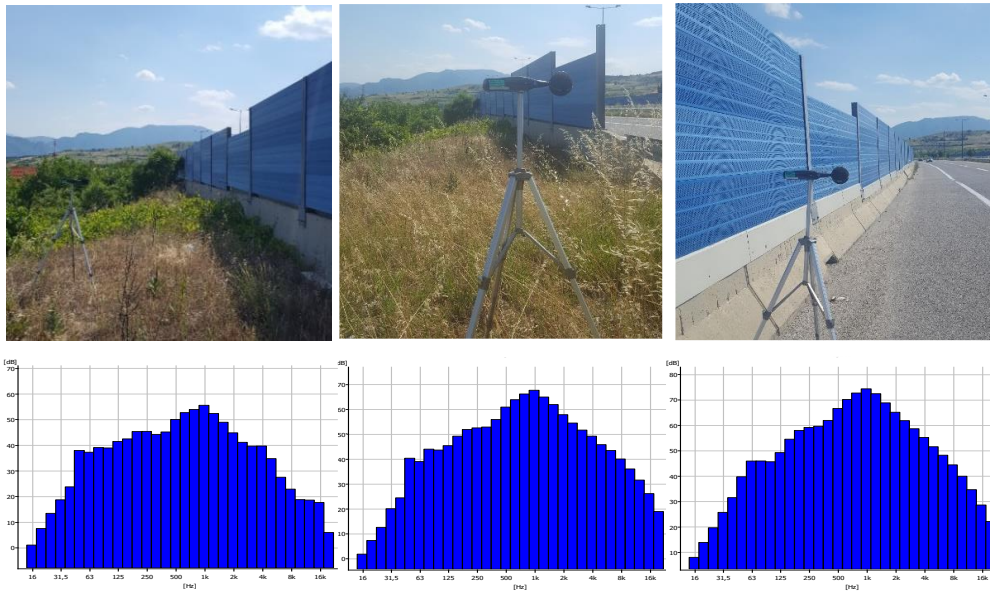
На избраните локации во градот Скопје, мерењата согласно индиректниот метод се спроведени со поставување на приемниците, односно мерните микрофони согласно параметрите кои се прикажани на шематскиот приказ на Слика 2-13. Мерните микрофони се поставени на 1.5 [m] висина од земјата, а растојанијата до звучната бариера се различни за двата случаи и зависат од условите кои ги дозволува теренот.

Еден од факторите што треба да се земат предвид во изборот на периодот на мерење се поволните временски услови, особено брзината и насоката на ветерот. Претпочитаните услови се за дневни периоди кога се очекува слаб ветер или смиреност. Во повеќето студии, мерењата „пред“ и „после“ се преземени истовремено за да се обезбедат исти услови на животната средина (т.е. бучава во позадина, сообраќај и метеоролошки услови).

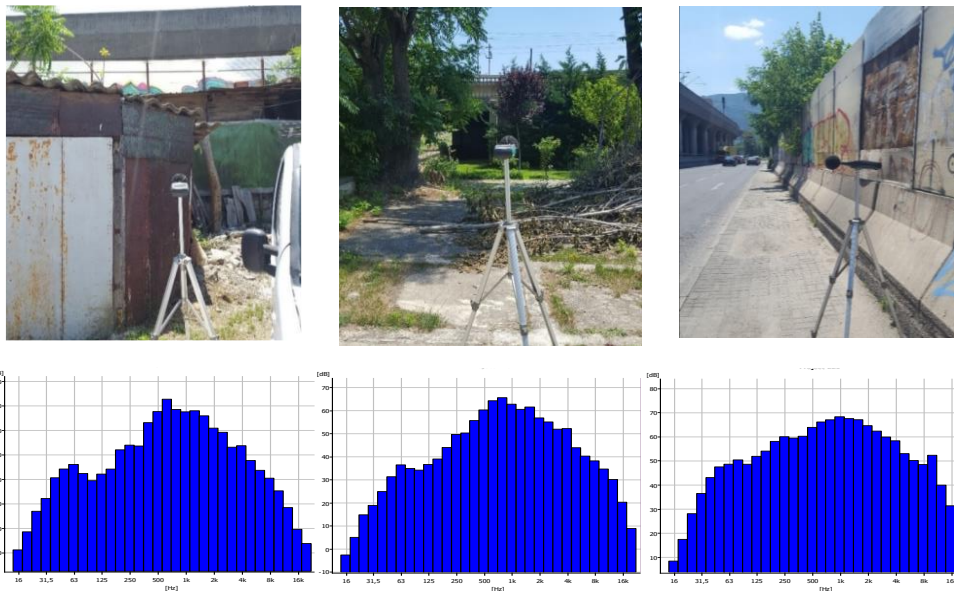
Времетраењето на мерењата во студиите засновани на индиректниот метод зависи од природата на изворот на бучава. Во случај на бучава од патниот сообраќај, периодот обично е доволно долг за да се обезбеди репрезентативност на спектарот на сообраќајната бучава. Во пракса, времетраењето на мерењето во повеќето студии се движи од 10 до 30 минути, а најчеста вредност е 15 минути. Во некои студии е предложено користење на подолги периоди (како 1 час или ден) кога се очекува дека

варијациите на бучавата ќе бидат значителни, но овие подолги периоди се чини дека не се користат во пракса.

Мерењата на избраните локации во градот Скопје се спроведени 3 пати со цел да се обезбеди повторливост, а временскиот интервал е во времетраење од 10 минути. Мерењата беа спроведени со користење на мерен инструмент Bruel&Kjaer 2250 од Класа 1. Препорачаниот индикатор за бучава е еквивалентно ниво на звучен притисок пондерирана според А тежинска крива (L_{Aeq}).



Слика 2-14: Фотографии од мерните локации на Обиколницата во градот и фреквентните спектри од бучавата во измерените временски интервали



Слика 2-15: Фотографии од мерните локации на во Центарот на градот и фреквентните спектри од бучавата во измерените временски интервали

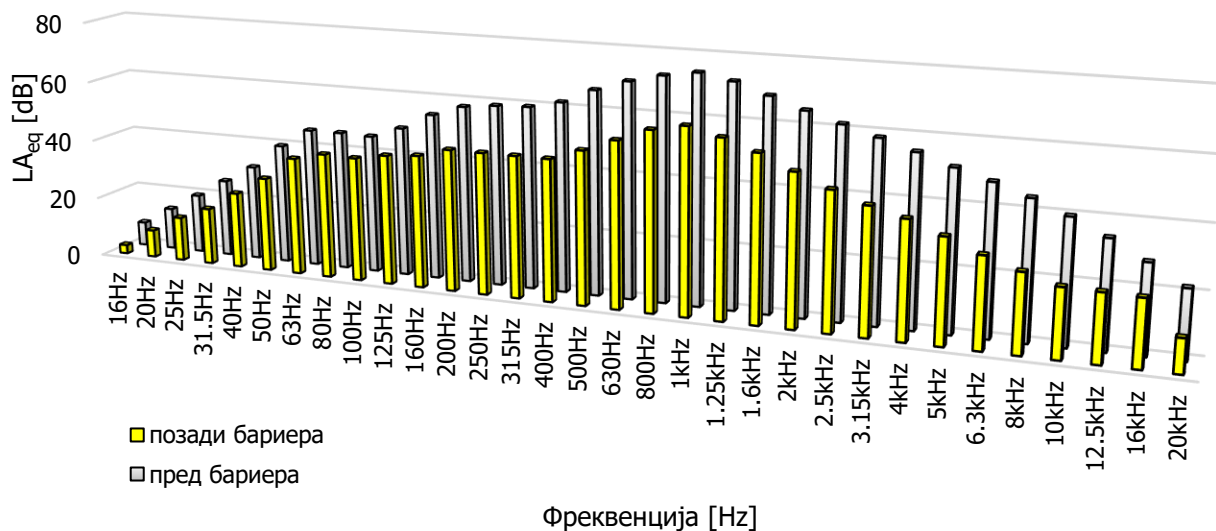
На фотографиите на Слика 2-14 и Слика 2-15 се прикажани избраните мерни точки за двете локации во градот Скопје. Под фотографиите се дадени 1/3 октавните спектри добиени од трите повторливи мерења за секоја мерна точка во 10-минутните мерни интервали, а резултатите од истите ќе бидат дискутирани подолу.

2.5.3. Резултати од применетиот метод за анализа на ефикасноста на звучните бариери

Од спроведените мерења на избраните две локации во градот Скопје, а тоа се Обиколницата надвор од градот каде се поставени звучни бариери за заштита на населено место од бучавата од автопатот и локацијата во Центарот на градот кај транспортниот центар каде се поставени звучни бариери за заштита на населба од бучава од улица, крстосница и железничка линија, добиени се резултати за нивото на вкупната бучава предизвикана од овие извори. Имено, на Слика 2-16 се претставени резултатите за нивото на бучава пред звучната бариера и позади звучната бариера на Обиколницата во градот. Од резултатите, забележителни се разликите во нивото на бучава пред и позади бариерата во целиот фреквентен опсег, кое укажува на тоа дека звучната бариера има голема улога во намалувањето на бучавата на оваа локација.

Она што е забележително е значителната разлика од 14 [dB] во нивото на бучавата пред и позади бариерата кои се најголеми на фреквенција од 1 [kHz] која се смета како доминантна кога станува збор за сообраќајна бучава.

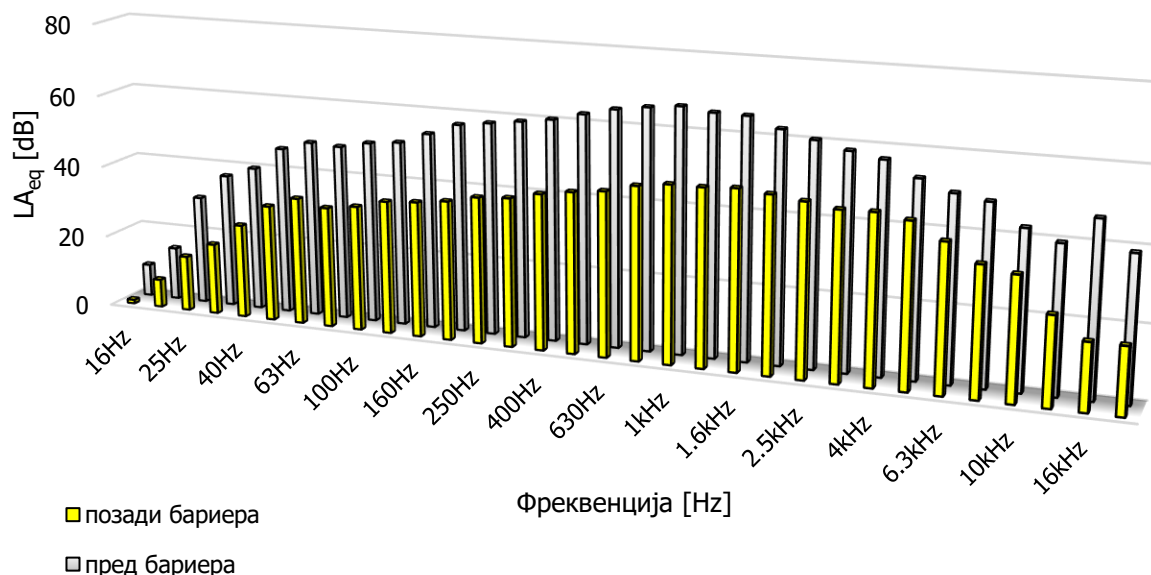
Ниво на бучава во 1/3 октавен спектар на Обиколница



Слика 2-16: Резултати од измерените вредности за бучавата пред и позади бариерата поставена на Обиколницата во градот Скопје

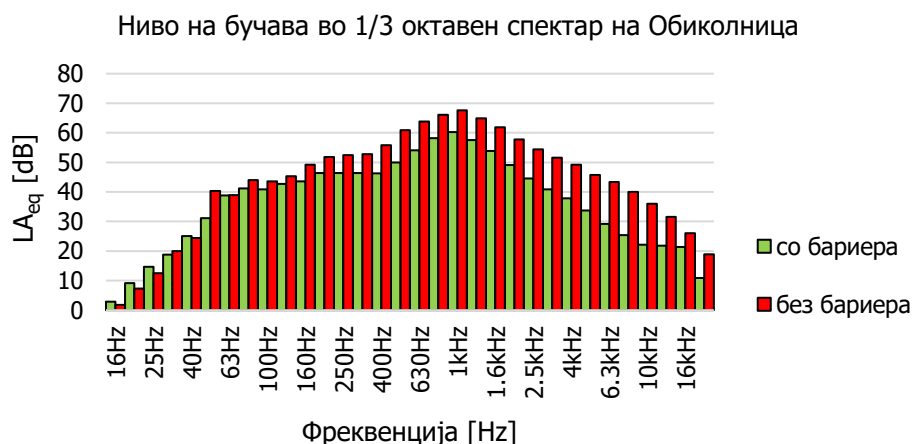
На Слика 2-17 се претставени резултатите од измерените нивоа на бучава пред и позади звучната бариера на локацијата во Центарот на градот. Разликите во нивоата на бучава во [dB] се очигледни, но тука може да се забележат изразени разлики и на останати пониски фреквенции како 31.5 [Hz] каде разликата е приближно 18 [dB] и на повисоки фреквенции како 16 [kHz] каде разликата достигнува 28 [dB]. Оваа разлика во дискрепанците во нивоата на бучава на различни фреквенции кај едната и другата локација веројатно се должи на тоа што на локацијата во центарот на градот се присутни и други извори на бучава покрај сообраќајната (беше забележан доминантен извор на бучава од градежни активности, бучава од лаеж на кучиња, како и бучава од железнички сообраќај), додека на мерната локација на Обиколницата доминантен извор на бучава е само сообраќајот.

Ниво на бучава во 1/3 октавен спектар во Центар



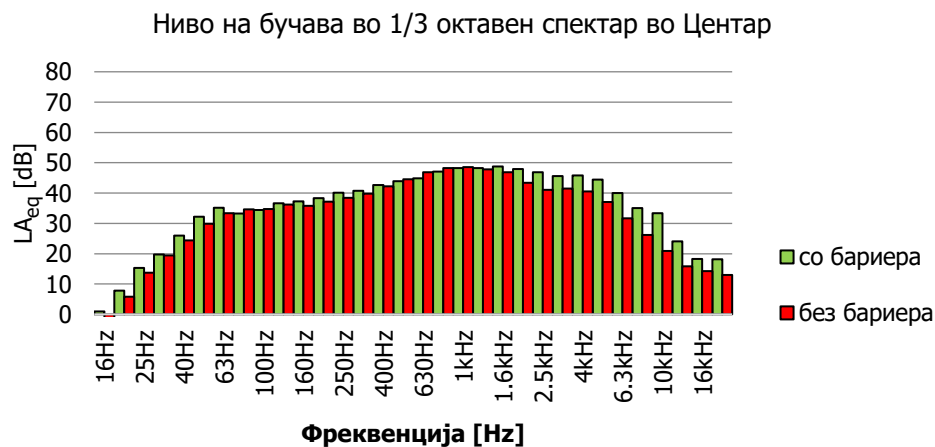
Слика 2-17: Резултати од измерените вредности за бучавата пред и позади бариерата поставена во Центарот на градот Скопје

На Сликата 2-18 се прикажани вкупните нивоа на бучава во [dB] во 1/3 октавен спектар за мерната точка позади звучната бариера и мерната точка на еквивалентната локација каде што не е поставена звучна бариера на Обиколницата во градот Скопје. Од резултатите може да се забележи дека разликите во нивото на бучава на пониските фреквенции (до 200 [Hz]) се многу помали отколку разликите на повисоките фреквенции, особено на фреквенциите над 1000 [Hz].



Слика 2-18: Резултати од измерените вредности за бучавата на мерните локации без и со звучна бариера на Обиколницата во градот Скопје

Истото може да се забележи и на Сликата 2-19, каде се прикажани нивоата на бучава на мерната точка позади бариерата, како и на еквивалентната точка каде не е поставена звучна бариера за мерната локација во Центарот. Тука воочливо е дека разликите во нивоата на бучава се мали, дури и негативни за фреквенците до 1000 [Hz]. Над 1000 [Hz], разликите во нивото на бучава на мерната точка каде нема бариера се очигледно поголеми. Исто така, од графикот прикажан на Сликата евидентна е разликата во нивоата на бучава на фреквенциите до 100 [Hz] кои се дури и поголеми во мерната точка каде има бариера, споредено со измерените во точката каде нема бариера.



Слика 2-19: Резултати од измерените вредности за бучавата на мерните локации без и со звучна бариера во Центарот на Скопје

Од прикажаните резултати, може да се заклучи дека звучните бариери кои се поставени на двете локации во градот Скопје имаат значително влијание во заштитата од бучавата на населените места, и тоа не само од сообраќајната бучава која е изразена

на 1 [kHz], туку и од бучавата од останатите извори. Исто така, очигледно е дека и во двата случаи, на двете мерни локации, звучните бариери кои се земени во предвид при анализата покажуваат солидни перформанси во заштитата од бучавата на повисоките фреквенции од 100 [Hz] до 2000 [Hz]. Овие резултати се очигледен индикатор дека звучните бариери имаат намалена ефикасност на пониските фреквенции, кое ја потврдува иницијалната претпоставка поврзана со фреквентниот домен во кој звучните бариери како пасивен метод имаат намален перформанс.

2.6. ЗАКЛУЧОЦИ ОД ПРИМЕНЕТИТЕ МЕТОДИ ЗА ПРОЦЕНКА И КОНТРОЛА НА ВЛИЈАНИЕТО НА СООБРАЌАЈНАТА БУЧАВА

Спроведените анализи кои беа изложени во ова поглавје укажуваат на тоа дека меѓу многуте фактори кои го зголемуваат нивото на бучава во градот Скопје, еден од највлијателните е бучавата од патниот сообраќај. Картата на бучава на избраната област во градот Скопје „Дебар Маало“ претставува вистински важен прв чекор за идна работа во целиот град за справување со проблемот со звучното загадување. Технологијата за мапирање на сообраќајната бучава е погодна бидејќи овозможува, преку лесно достапно собирање податоци за протокот на сообраќај, да се обезбеди визуелна претстава за ситуацијата со бучавата и дистрибуција на нивото на бучава низ областа, особено фокусирајќи се на проблемот со сообраќајната бучава. Од друга страна, валидацијата на оваа методологија со користење на конвенционална методологија заснована на акустични мерења, дава добро решение за подобро разбирање на причините за звучното загадување и влијанието на сообраќајната бучава во вкупното ниво на бучава. Несогласувањата во нивоата на бучава во текот на ноќните и дневните часови кои беа констатирани, се должи на разликата во изворите на бучава во ноќниот период од денот во однос на денот и вечерниот период. Ова може да доведе до заклучок дека густината на сообраќај во текот на ноќта е помала, но други извори како човечки говор или музика може да бидат доминантни. Затоа, треба да се направи дополнителна анализа на присуството на различни видови извори на бучава и нивното влијание со цел да се обезбеди попрецизен увид во состојбата со бучавата во областа.

Од друга страна, најчесто применувано решение за проблемот со зголемено ниво на бучава предизвикано од патниот сообраќај е инсталација на звучни бариери онаму каде е потребно со цел да се заштити определена населба која е значително изложена на бучава, а во градот Скопје вакви звучни бариери се поставени само на неколку локации. Согласно истражувањето спроведено во ова поглавје, бариерите кои се поставени во градот покажуваат солиден перформанс со степен на намалување на бучавата и за повеќе од 10 [dB] во целиот фреквентен опсег. Она кое беше забележано од спроведените анализи на резултатите на двете локации е дека звучните бариери покажуваат подобри карактеристики на повисоки фреквенции, додека пониска стапка на намалување на звучниот интензитет покажуваат на пониските фреквенции. Оттука може

да се заклучи дека звучните бариери се соодветно решение онаму каде е потребна заштита од сообраќајната бучава која е доминантна на фреквенциите од 1 [kHz] и повисоки, но за локациите каде се јавуваат и различни извори на бучава на пониски фреквенции, нивната примена не е доволна за комплетна заштита и контрола од бучавата. За таа цел, научно-истражувачката работа се насочува кон развој на системи за активна контрола на звукот, чија цел е справување и контрола на ниско-фреквентните звуци кои често се извор на непријатен звук во животната средина покрај сообраќајната бучава.

3

МОДЕЛИРАЊЕ И СИМУЛАЦИЈА НА ЕДНОДИМЕНЗИОНАЛНА АКУСТИЧНА СРЕДИНА

Стандардните методи за контрола на звукот подразбираат користење на пасивните методи за контрола на звучната средина, кои се често скапи и масивни и поради тоа не претставуваат оптимално решение за проблемот со непосакуваниот звук. Поефикасен пристап за справување со непосакуваниот звук од било каква природа подразбира анализирање на изворот на звукот и согласно тоа, специфицирана контрола на звукот на самата локација на изворот. Денес, истражувањата сугерираат на најголема предност на интегрирана контрола на звучниот извор во самиот дизајн на машините, кое ќе придонесе не само за намален произведен звук, туку и за нивна подобра работна состојба [169].

Имајќи во предвид дека модерната технологија за активна контрола на звук се темели на фундаменталниот принцип на интерференција на звучни бранови, со цел успешна имплементација на истата, неопходно е познавање и разбирање на физичките принципи на акустиката, карактеристиките на акустичната средина и како тие можат да бидат применети за намалување на звукот. Голем број од најновите истражувања во насока на анализа на предизвиците и можностите на физичката имплементација на активна контрола на акустична средина се темелат на нумеричко моделирање на акустичната средина преку користење на методот на конечни елементи (МКЕ) [170]. Преку моделирање и симулации со МКЕ во софтверските пакети, од една страна се подобрува увидот во физичките услови и ограничувања на физичката средина за имплементација на систем за активна контрола на звук, а од друга страна се олеснува пристапот кон техничкото решение, подразбирајќи избор на соодветна хардверска и софтверска технологија.

Една од категориите со кои е засегната контролата на звукот во акустична средина е пропагацијата на звукот во канали. Каналите можат да бидат разгледувани како затворени простори во кои едната димензија (должината) е многу поголема од останатите две (напречниот пресек). Вообичаени примери за акустични канали

претставуваат отворите за централно греење и климатизација, издувните системи кај возилата, а како не толку очигледен пример може да се споменат долги ходници кои поврзуваат две или повеќе простории во објектите. Основната акустична карактеристика на пропагацијата на звукот во каналите е неговата ограниченост во две димензии, а слобода за распространување во третата димензија, во која звукот се простира слободно [171].

Во рамките на ова Поглавје, но и понатаму во оваа докторска дисертација предмет на истражување ќе биде контролата на акустичната средина во акустичен канал. Пред да се премине на пристапот за активна контрола на акустичната средина во канал, неопходно е да се спроведе карактеризација на акустичните карактеристики на ваква акустична средина. Со ова ќе се обезбеди основа за понатамошно разбирање и оптимизација на физичките механизми за контрола на пропагацијата на звукот во каналите.

3.1. КАРАКТЕРИСТИКИ НА АКУСТИЧНА СРЕДИНА

Акустиката е дефинирана како наука која ги третира изворот на звукот, ширењето, приемањето и ефектите од звукот, како и контролата на акустичните средини. Она што е важно е дека акустиката претставува еден дел од динамика на флуидите каде што проблемите кои се третираат имаат нелинеарна природа, што значи дека не е достапно точно општо решение на нивните математички записи. Поради тоа, во акустиката се применува апроксимација од прв ред во која нелинеарните ефекти се занемарени [172].

Со цел да бидат применети и објаснети математичките претставувања на параметрите со кои се карактеризираат акустичните средини, мора да се познаваат основите на равенствата за одржување на масата во нивната општа форма, односно математичките и физичките својства на одржување на маса, количество движење и енергија. За нивна целосна применливост во акустичните системи, во основа тие мора да бидат надополнети со конститутивните релации како термодинамичките равенки на состојба [173].

3.1.1. Равенка на бран

Од физичка или математичка гледна точка, акустиката може да се разгледува како пристап за анализа на решенијата на брановата равенка за флуидите. Линеарната равенка на бран ја опфаќа пропагацијата на мали (линеарни) нарушувања на компресибилен медиум [174].

Равенствата за континуитет и количество движење за невискозни флуиди се дадени со равенствата (3.1) и (3.2):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla t + \rho \vec{v} \nabla \vec{v} = 0 \quad (3.2)$$

Равенствата укажуваат на запазување на материјата и на тоа дека Њутновите закони важат за флуидите, како и за цврстите честички. Под претпоставка дека промената во динамиката на флуидните честички се мали, вредностите за притисокот, брзината и густината може да се заменат со збирот од нивните средни вредности и малите флукуации. Со заменување на изразите за трите основни параметри, се добиваат линеаризираните Ојлерови равенства:

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \nabla \vec{v}' = 0 \quad (3.3)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \nabla p' = 0 \quad (3.4)$$

Со елиминација на брзината од равенствата, се добива:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \nabla \vec{v}' \right) - \nabla \left(\rho_0 \frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} + \nabla p' \right) = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = 0 \quad (3.5)$$

Преку поставување на врска помеѓу притисокот и густината, земајќи ги во предвид термодинамичките карактеристики на флуидот, следува:

$$c^2 = \left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_{\rho=\rho_0} \quad (3.6)$$

Со замена на равенството (3.6) во равенството (3.5), се добива брановата равенка за акустичен притисок (3.7):

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0 \quad (3.7)$$

Равенството (3.7) ја претставува фундаменталната равенка во акустиката која ги опишува параметрите на звучното поле во просторен и временски домен, како и нивната промена. Основна карактеристика на оваа равенка е што таа е линарна, што значи дека збирот на две решенија на равенката е исто така решение на истата. Вредноста на константата "c" претставува брзина на звукот, односно брзина со која малите нарушувања пропагираат низ флуидот и тоа зависи од термодинамичките карактеристики на флуидот. За бранови со една фреквенција, односно чисти тонови кои ќе бидат предмет на разгледување во понатамшната работа важи дека $p = P e^{-j\omega t}$, каде

ω претставува кружната фреквенција, па оттука брановата равенка преминува во Хелмхолцовата равенка дадена со (3.8):

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0 \quad (3.8)$$

Во оваа равенка не фигурира времето t , со што се намалува редот на равенката. Кога се работи за бранови со константни фреквенции, звучното поле има синусоиден облик кој се распространува во просторот со бранова должина дадена со равенството (3.7), каде брановиот број означен со “ k ” се пресметува со равенството (3.9).

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi}{k} \quad (3.9)$$

$$k = \frac{\omega}{c} \quad (3.10)$$

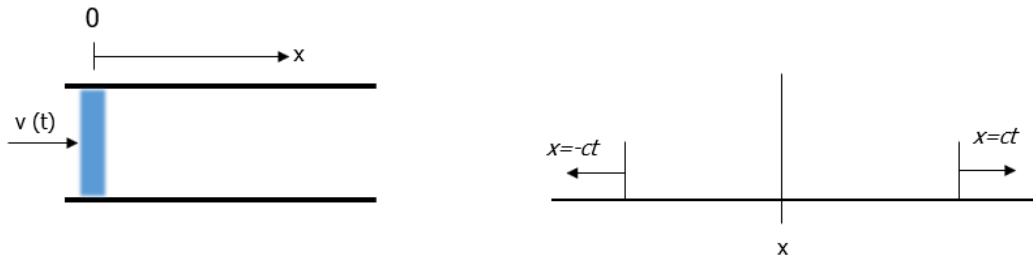
3.1.2. Теорија на рамни бранови

Еднодимензионалните бранови, или рамните бранови се карактеристични за звучни полиња кои пропагираат низ тесен и долг простор. Со цел да се илустрираат некои аспекти на решенијата на брановата равенка, мора прво да се разгледаат еднодимензионални бранови, кое е допустливо да се направи кога брановата должина на звучниот бран е многу поголема од дијаметарот на каналот низ кој бранот пропагира.

Ако x -оската е координата по должина на каналот, брановите карактеристики се независни од y и z и брановата равенка (3.7) станува:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (3.11)$$

Со цел да се определи партикуларното решение, мора да бидат специфицираат почетни и гранични услови во контекст на реален проблем. Ако постои извор на звук во облик на клип и е позициониран на $x = 0$ во полубесконечен канал, во време $t=0$, клипот ќе почне да осцилира околу неговата средна позиција со брзина $v(t)$. Бидејќи каналот е долг, физичкиот принцип на каузалност укажува дека сите бранови мора да пропагираат нанадвор, од изворот кон излезот, односно надесно. Ова претставува хомоген граничен услов.



Слика 3-1: Пропагација на звучен притисок

Ова значи дека нарушувањата на звучниот притисок се шират во точно определени облици по x -оската со брзина “ c ” и решенијата во облик $p = f(x \pm ct)$ ја задоволуваат равенката. Во секој момент од движењето на бранот налево $x = -ct$ и надесно $x = ct$, притисокот ќе има иста вредност како и кога $t = 0$ (Слика 3-1).

За хармониски бранови, генералното решение на диференцијалната равенка (3.9) има облик:

$$p'(x, t) = Ae^{-i\omega(t-\frac{x}{c})} + Be^{-i\omega(t+\frac{x}{c})} \quad (3.12)$$

Брзината на флуидиот е во релација со акустичниот притисок p' преку равенката на количество движење:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x} \quad (3.13)$$

Со замена во истата и со користење на граничните услови на $x = 0$ се добива:

$$f\left(t - \frac{x}{c}\right) = \rho cv\left(t - \frac{x}{c}\right) \text{ за } t \geq \frac{x}{c} \quad (3.14)$$

Почетните услови $v(0, x) = 0$ за $x > 0$ укажуваат дека звукот произведен од осцилациите на клипот нема да достигнат локации $x > ct$. Ова е еквивалентно на $v(t) = 0$ за $t < 0$.

За хармониски осцилации каде $v(t) = Ae^{-i\omega t}$, $v(t)$ може да се дефинира за сите моменти од времето, па физичкото решение е реалниот дел (или имагинарниот) од вкупното решение е претставено со:

$$p' = A\rho \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right] \quad (3.15)$$

Кога брановите се распространуваат на овој начин, тие се нарекуваат рамни бранови бидејќи нивните карактеристики (фаза) се константни во рамнината нормална на x .

Брановите можат да бидат моделирани како планарни (рамни) кога фреквенцијата на пропација е ниска, како во случајот на акустичните канали.

3.1.3. Акустична импеданса

Акустичната импеданса претставува мерка за отпорот на движењето на флуидот и е дефинирана како однос помеѓу звучниот притисок и брзината на определена акустична честица во флуидот преку равенството:

$$z = \frac{p}{v} = \rho c \quad (3.16)$$

каде:

z =специфична акустична импеданса ($[Ns/m^3]$ или Рејли)

p =звучен притисок [Pa]

v =брзина на акустична честица [m/s]

ρ =густина на медиумот [kg/m^3]

3.1.4. Интензитет на рамен бран

Друг важен акустичен параметар е мерката за енергијата на флуидот кој пропагира низ определен простор во единица време. Ова е претставено со интензитетот на акустичното поле. За рамни бранови се дефинира како акустична моќност која поминува низ определен напречен пресек во насока на нормалата на површината:

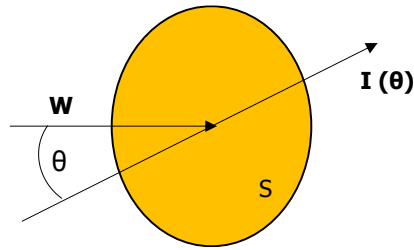
$$I(\theta) = \frac{E \cos(\theta)}{TS} = \frac{W \cos(\theta)}{S} \quad (3.17)$$

Ако $v = \frac{p}{\rho c}$, средната вредност на акустичниот интензитет е:

$$I = \frac{1}{2} A^2 \rho c \quad (3.18)$$

Средната вредност на моќноста е:

$$P = \frac{1}{2} A^2 \rho c S \quad (3.19)$$



Слика 3-2: Графичка репрезентација на векторите на моќност и интензитет на рамен бран

каде:

E = енергија која ја содржи звучниот бран [Nm/s]

\vec{W} = моќност на звукот

$\vec{I}(\theta)$ = интензитет кој минува низ напречниот пресек во насока на неговата нормала [W/m²]

S = напречен пресек [m²]

T = период на бранот [s]

θ = агол помеѓу насоката на ширење на бранот и нормалата на површината

Максималниот акустичен интензитет I се добива кога насоката на ширење на бранот се поклопува со нормалата на рамната површина, односно кога аголот $\theta = 0$.

$$\vec{I} = \frac{\vec{W}}{A} \quad (3.20)$$

Рамните бранови се најчесто анализирани бранови форми поради тоа што математичката репрезентација и формата се едноставни. Еден бран се смета за рамен кога неговите карактеристики не се менуваат во рамнината која е нормална на насоката на ширење на бранот (Слика 3-1). Со користење на равенката за специфична акустична импеданса (3.16), за рамен бран се добива:

$$\vec{I} = \frac{\vec{p}^2}{\rho c} \quad (3.21)$$

каде p = RMS вредност на акустичниот притисок [Pa]

Акустичниот притисок претставува RMS вредност од звучниот притисок усреднет за еден циклус:

$$p = p_{rms} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T P^2 \sin^2 \omega t dt \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{P}{\sqrt{2}} \quad (3.22)$$

За чист хармониски тон, односно синусен бран, акустичниот притисок е 0,707 од максималната вредност. Средниот акустичен притисок е нула бидејќи неговата вредност варира над и под нормалниот атмосферски притисок, но енергијата не е нула. Исто така, важно е да се земе во предвид дека RMS вредноста на притисокот на комбинација на повеќе бранови форми не зависи од фазната врска помеѓу тие бранови.

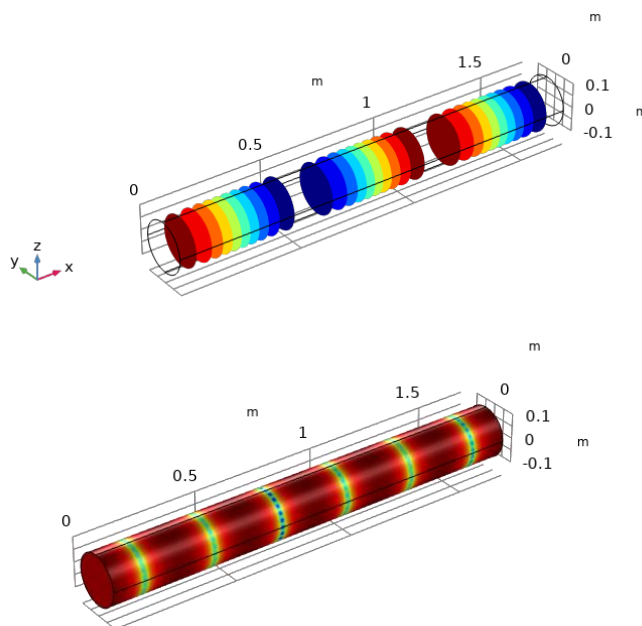
Акустичниот интензитет е значително важна акустична карактеристика која е директно мерлива преку инструментите за мерење на звук. Тој е пропорционален на моќноста, па затоа кога брановите се комбинираат, нивните интензитети може да се собираат аритметички.

3.1.5. Карактеристики на еднодимензионална акустична средина во канал

Каналите можат да бидат разгледувани како акустични средини каде што едната димензија (должината) е многу долга во споредба со останатите две, често завршувајќи во отворен простор. Геометријата на каналот како едноставно затворен простор со отстранета граница од едната страна ни дава индикации за структурата на звучното поле внатре во каналот. Ограничените страни може да се очекува да имаат модален одговор, сличен на оној на целосно затворен простор. Кога звучен бран се вклопува во напречниот пресек на каналот, амплитудниот одговор ќе биде максимален, резултирајќи во резонантна фреквенција. Отворената страна може да се очекува да има одговор сличен на ширење на звукот во слободен простор. Во отсуство на какви било граници, звучните бранови едноставно ќе се рашират низ отворениот простор и нема да има резонантен одговор поврзан со оваа страна на каналот. Овој интуитивен модел на звучни полиња во каналите е суштински точен, но неопходно е земањето во предвид на некои детали за да се обезбеди целосен опис.

3.1.6. Режији во канали

Каналите имаат модална форма на одговор, но сепак, за разлика од режимите на однесување на флуидите во затворен простор, режимите на каналите се ограничени на една или две димензии (зависно од напречниот пресек). Различните режими на каналите кои зависат од нивната геометрија, како и акустичното поле внатре во нив, исто така се шират надолу по каналот. Основниот или најнискиот режим на фреквенција, односно модална форма на одговор во каналот е рамниот бран.



Слика 3-3: Визуелна репрезентација на рамен бран во канал

Осврнувајќи се на Слика 3-3, може да се забележи дека радниот бран има рамномерна дистрибуција на звучен притисок во напречниот пресек на каналот и има иста бранова форма на притисок низ каналот како акустичен бран во слободен простор. Во теорија, режимот на радни бранови има резонантна фреквенција од 0 Hz, што е анаксијален режим со бесконечна должина во една насока. Сите режими во каналот освен режимот на радни бранови се означени како режими од повисок ред. Еден од најважните резултати во акустиката на каналите е тоа што модалните форми во каналот може да патуваат само ако фреквенцијата на звукот е поголема или еднаква на резонантната фреквенција на модот. Поради тоа, модовите на акустичниот притисок во каналите се нарекуваат “фреквенција на исклучување” или т.н. “cut-off” фреквенција. На сите фреквенции над оваа, нема да има пропација на бранот низ каналот и физички, акустичната енергија ќе се движи назад од каналот.

Фактот дека во различни режими, модовите на каналот можат да патуваат и да носат енергија само на фреквенции над нивната фреквенција на исклучување, има значителни импликации врз пристапите за контрола на звукот. На пример, ако пресекот на каналот е мал во споредба со фреквенцијата од интерес, и затоа ниту еден од режимите од повисок ред не е исклучен, тогаш во суштина целата акустична енергија што тече низ каналот ќе биде носена од режимот на радни бранови. Затоа, секој пристап за контрола на звукот мора конкретно да го таргетира режимот на радни бранови.

3.1.7. Акустично поле во канал со кружен напречен пресек

Со цел да се определи звучното поле во канал со кружен напречен пресек, мора да се претстават еднодимензионалните Хелмхолцови равенки:

$$\begin{aligned}\frac{d^2 p_z(z)}{dz^2} + k_z^2 p_z(z) &= 0 \\ \frac{d^2 p_\varphi(\varphi)}{d\varphi^2} + k_\varphi^2 p_\varphi(\varphi) &= 0\end{aligned}\quad (3.23)$$

каде $-k_z^2$ и $-k_\varphi^2$ се константи.

Решенијата на Хелмхолцовите равенки се од облик:

$$\begin{aligned}p_z(z) &= Ae^{-jk_z z} + Be^{jk_z z} \\ p_\varphi(\varphi) &= Ce^{-jk_\varphi \varphi} + Be^{jk_\varphi \varphi}\end{aligned}\quad (3.24)$$

Функцијата за притисокот $p_\varphi(\varphi) = p_\varphi(\varphi + 2\pi)$ претставува периодична функција со период π , што значи дека вредноста на k_φ мора да биде цел број. Подолу во текстот соодветно ќе се користи симболот m наместо k_φ . Доколку се искомбинираат претходните две равенства (3.24) се добива:

$$p_\varphi(\varphi) = E \cos(m\varphi + \varphi_m) \quad (3.25)$$

Оттука, се добива трансверзалниот бранов број k_r даден со:

$$k_r^2 = k^2 - k_z^2 \quad (3.26)$$

Диференцијалната равенка кој се добива со замена на овие равенства во погорните се нарекува Беселова функција:

$$\frac{d^2 p_r(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dp_r(r)}{dr} + p_r(r) \left(k_r^2 - \frac{m^2}{r^2} \right) = 0 \quad (3.27)$$

со општо решение:

$$p_r(r) = F J_m(k_r r) + G N_m(k_r r) \quad (3.28)$$

Каде J_m е Беселова функција од ред m и N_m е Нојманова функција од ред m . Нојмановите функции се познати и како Беселови функции од втор ред.

Решението на Беселовата функција дадена со равенството (3.28), може да се запише имајќи во предвид дека равенството може да биде задоволено само за дискретни вредности на k_r , односно $k_{r_{mn}}$ за $n = 0, 1, 2 \dots$

$$\vec{p}(r, \varphi, z, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} A_{mn} \sqrt{e_m} J_m(k_{r_{mn}} r) \cos(m\varphi + \varphi_m) (p_{mn+} e^{j(\omega t - k_{zmn} z)} + p_{mn-} e^{j(\omega t - k_{zmn} z)}) \quad (3.29)$$

Секој член во сумата од равенството (3.29) претставува мод. Секој мод има фреквенција на исклучување која произлегува од:

$$k_{zmn} = \sqrt{(k^2 - k_{r_{mn}}^2)} \quad (3.30)$$

Најниската фреквенција на исклучување на канал со кружен напречен пресек е фреквенцијата на исклучување на првиот неосносиметричен мод:

$$f = \frac{1.84c}{2\pi a} \quad (3.31)$$

Под оваа фреквенција пропагираат само рамни бранови, а со зголемување на ω , почнува да пропагира нов дополнителен мод. Како што варира фреквенцијата, со достигнување на фреквенцијата на исклучување на секој мод, се постигнува фреквенција на вклучување („cut-on“ фреквенција).

3.2. МОДЕЛИРАЊЕ И СИМУЛАЦИЈА НА АКУСТИЧНА СРЕДИНА ВО КАНАЛ СО КОРИСТЕЊЕ НА МЕТОДОТ НА КОНЕЧНИ ЕЛЕМЕНТИ (МКЕ)

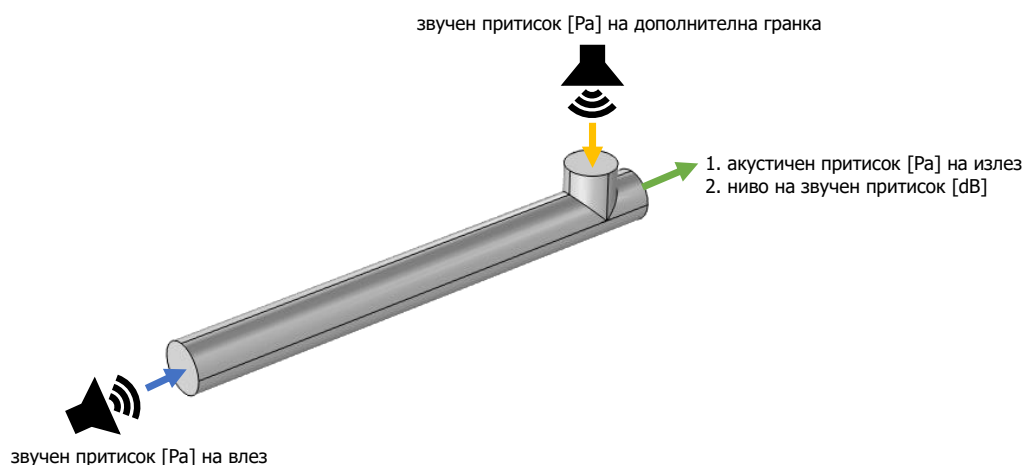
Со цел стекнување на подобар увид и разбирање на акустичната средина во затворени услови, неопходно е да се познаваат основите на звучната дисперзија и однесувањето на брановите земајќи ги во предвид карактеристиките на звучниот извор, звучниот притисок, брзината на флуидот, густината на флуидот, како и импедансата на елементот кој го ограничува звучниот простор, а истите зависат од материјалот од кој тој е изработен. За таа цел, спроведено е моделирање и симулација на акустична средина во канал преку користење на методот на конечни елементи (МКЕ). Имено, звучниот извор кој во реалноста може да биде елемент кој генерира звук со различни фреквенции и амплитуди, а со тоа и различна звучна моќност е моделиран како извор на планарни бранови со определен звучен притисок, а затворената акустична средина е моделирана како канал чии геометриски карактеристики и материјал ќе бидат предмет на истражување и во експерименталните моделирања како во ова поглавје, така и во

наредните. Моделирањето на акустичната средина на каналот е спроведено во програмскиот пакет COMSOL Multiphysics 5.6 со користење на акустичниот модул кој се декларира како сет од интерфејси за симулација на пропагацијата на звукот низ флуиди и цврсти материји во целосно мултифизичка средина. Акустиката на притисок („The Pressure Acoustics“ branch) се состои од интерфејси каде звучното поле се опишува преку притисокот „ p “ и акустичните проблеми се решаваат во фреквентен домен, користејќи ја Хелмхолцовата равенка и основите на акустиката опишани погоре.

Опишаниот пристап што следи, ги анализира аспектите на дисперзија на звукот во каналот со користење на МКЕ моделирање и симулација, понатаму земајќи ги предвид основите на активната контрола на бучавата со цел да се определат граничните физички услови кои важат за примена на активна контрола на звукот на систем со овие карактеристики. За предмет на разгледување избран е модел на канал кој со своите геометриски и материјални карактеристики ќе биде предмет на експериментални истражувања, како за валидација на резултатите од МКЕ анализата, така и за експериментална примена на активната контрола на звук со користење на адаптивни алгоритми.

3.2.1. Моделирање на акустичен канал

Физиката на звучната дисперзија и акустичните параметри на звукот генериран во канал може да се моделираат и визуелизираат во софтвер за моделирање со МКЕ кој нуди акустични модули за визуелизација на ширењето на звукот. Ова подразбира испитување на акустичното однесување на звукот генериран од извор кој е соодветно моделиран во софтверска околина преку визуелизација на карактеристиките на звучното поле во затворената околина на каналот. Предмет на разгледување е примената на МКЕ за моделирање и симулација на канал со определени геометриски и физички карактеристики. Со ова се постигнува подобар увид во акустичното поле кое се создава внатре во каналот кога на едниот отворен крај од каналот се генерира звучен притисок, а истиот излегува од другиот слободен крај во отворено слободно поле. Дополнително, имајќи ги во предвид овие сознанија, предмет на разгледување е и потенцијалната имплементација на активна контрола на звучната средина која се случува внатре во каналот преку додавање на странична гранка на каналот и моделирање на секундарен извор на звучен притисок како симулација на условите на активна контрола на звукот (Слика 3-4). Изворите на звук, примарниот и секундарниот генерираат звучни полиња кои се фазно поместени за 180° согласно основниот услов за постигнување на активна контрола, а фреквенциите кои се користат се чисти синусоидни тонови во рангот на фреквенции кој е определен со дополнителни анализи опишани подолу. Вака моделираниот физички модел, со своите геометриски и физички услови, како и моделираните извори на звук е испитуван со спроведување на студија во фреквентен домен, а како резултат се добиваат акустичниот притисок во [Pa] и нивото на звучен притисок во [dB] на излезот од каналот.

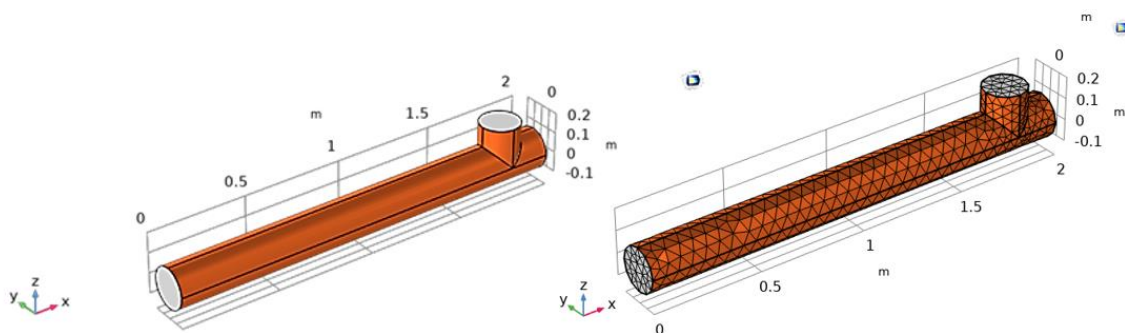


Слика 3-4: Илустративен приказ на методот и условите за примена на МКЕ моделирање

Целта е да се добие детален увид во акустичната средина која се случува во каналот со зададените почетни и гранични услови, а преку тоа и донесување заклучоци за рангот на фреквенции во кој потенцијално се постигнува најголема ефикасност на системот за активна контрола. Исто така, не помалку важно е да се обезбедат сознанија за тоа колкав степен на намалување на нивото на звучен притисок и на кои фреквенции може да се постигне, и крајно како овие заклучоци ќе допринесат кон креирање на техничките услови за поставување на експериментален систем за имплементација на активна контрола на звучната средина во каналот.

3.2.2. Физички карактеристики на моделот

Акустичниот канал кој се користи како влезна геометрија во моделот е креиран со кружен напречен пресек од 0.2 [m] во дијаметар и должина од 2 [m], како што е прикажано на Слика 3-5. Нему му е додадена дополнителна гранка на 1.7 [m] од почетокот на каналот, со ист напречен пресек.



Слика 3-5: Приказ на геометријата на моделот креиран во COMSOL 5.5 и мрежата на конечни елементи

Материјалот од кој е изработен каналот е ПВЦ материјал, со неговите карактеристики дефинирани во софтверската база на податоци. Дополнително се додадени и акустичните карактеристики кои ќе влијаат на распространувањето на звучните бранови и креирањето на акустичната средина. Карактеристиките на материјалот се дадени во Табелата 3.1.

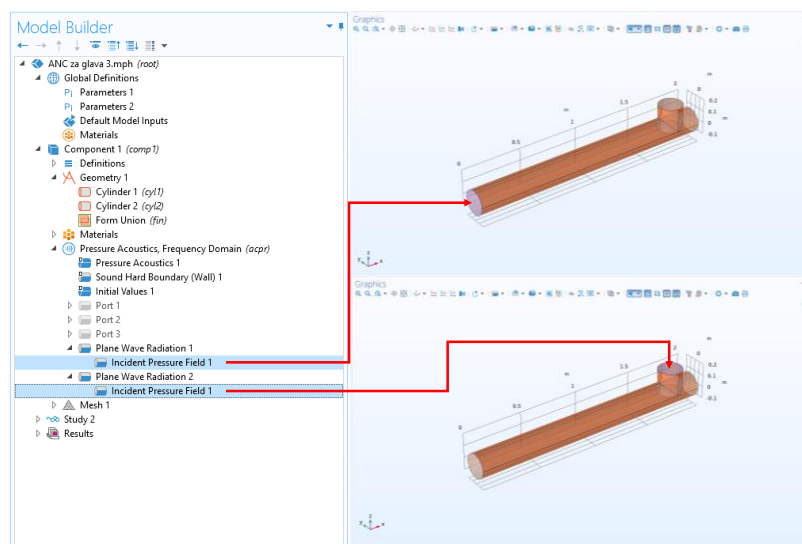
Табела 3.1: Карактеристики на материјалот на каналот

Карактеристика	ПВЦ материјал
Коефициент на термална експанзија	$100 \cdot 10^{-6}$ [1/K]
Релативна пермитивност	2.9
Густина	1760 kg/m^3
Термална спроводливост	$0.1 \text{ [W/m} \cdot \text{K]}$
Јунгов модул на еластичност	$2.9 \cdot 10^6$ [Pa]
Поасонов коефициент	0.4
Звучна дифузност	$0.5 \text{ m}^2/\text{s}$

Каналот го ограничува воздушниот простор кој исто така се задава преку карактеристиките кои влијаат на акустичната средина, а тоа се брзината и густината на воздухот.

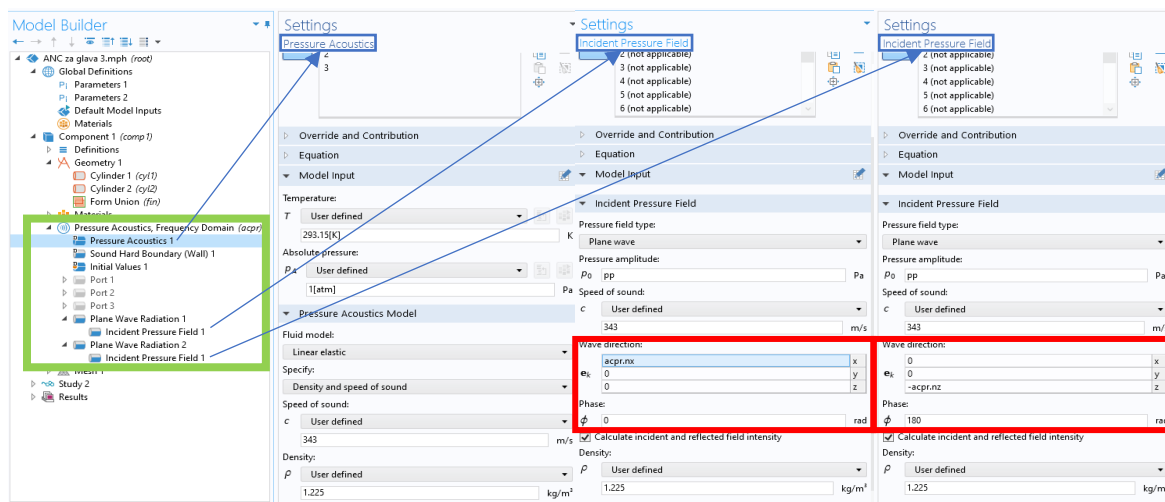
3.2.3. Гранични услови

Акустиката на звучен притисок се базира на задавање на почетните и граничните услови на системот, кое во случајот подразбира дефинирање на изворите на звук. Согласно претходно објаснетото, пропагацијата на звук во канали чија должина е многу поголема од нивниот дијаметар, се случува во облик на планарни, односно рамни бранови.



Слика 3-6: Моделирање на почетните услови во COMSOL 5.5

Имено, во овој модел е избрано декларирање на примарниот, како и секундарниот извор на звук преку дефинирање на притисокот на рамнината (кружната површина) во која лежи изворот на звук и преку задавање на радијација на рамен бран (Слика 3-6). Со тоа се дефинира полето на дисперзија на звучниот бран кој се генерира, а понатаму и неговата насоченост. Звучните бранови генерирани во соодветната рамнина, понатаму се дефинираат со насока на нивно ширење согласно оските на поставеност на моделот (Слика 3-7).

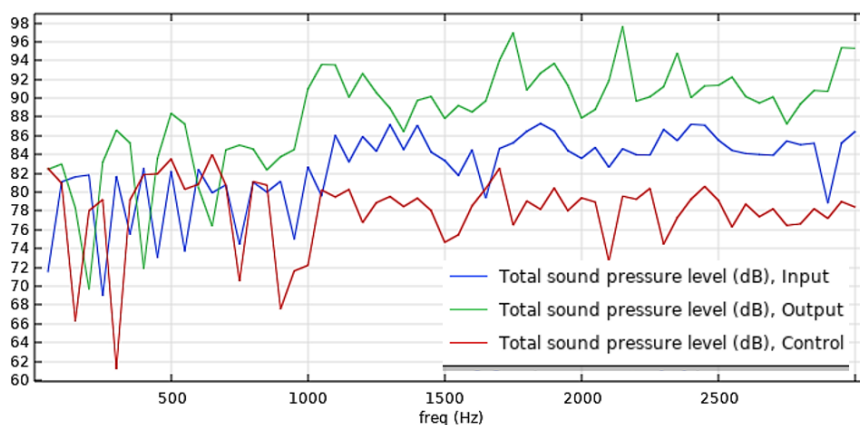


Слика 3-7: Задавање на параметри за моделирање во COMSOL 5.5

3.2.4. Студија за акустичниот притисок во фреквентен домен

Со цел да се добие моделот на пропација на звукот во каналот, користена е студијата за анализа на акустичниот притисок анализирана во фреквентен домен. Изворите на звук од влезниот звучник и контролниот звучник се симулирани како мембрани кои генерираат рамни бранови за да се симулираат промените во воздушниот притисок. Вредноста за амплитудата на притисокот како почетен услов е зададена во [Pa] откако претходно беше измерена вредноста на звучниот притисок која ја генерираат звучниците од експерименталниот модел на секоја од фреквенциите за кои беше направена симулацијата. За да се добие дисперзија на звукот во акустичниот канал, студијата е спроведена за фреквенции до 2500 Hz (Слика 3-8).

Од резултатите прикажани на Слика 3-8, може да се заклучи дека нивото на излезниот акустичен притисок на отворениот крај на каналот (зелена линија на графикот) каде всушност целта е да се постигне намалување на звукот, укажува на намалување на некои од фреквенциите до 800 [Hz], а над 800 [Hz] се забележува очигледно зголемување на излезниот звучен притисок.



Слика 3-8: Ниво на звучен притисок од примарниот, секундарниот извор и на излезот од каналот

Пресметковната вредност на првата фреквенција на исклучување на системот согласно равенката (3.30) е 1004.9 [Hz], кое кажува на тоа дека планарна дисперзија на брановите низ каналот се очекува да биде забележана до оваа фреквенција.

$$f_{10} = \frac{1.84 \cdot 343}{2\pi \cdot 0.1} = 1004.9 \text{ [Hz]} \quad (3.32)$$

Симулацијата на акустичната средина на овие фреквенции покажува дека со додавање на страничната гранка во системот, граничната фреквенција на дисперзијата на рамни бранови ја намалува својата вредност поради губитоци во звучната енергија кон страничната гранка, но и прераспределување на струењето на звучните бранови од примарниот извор на звук кон страничната гранка и излезот, од страничната гранка кон излезот и кон примарниот извор. Со додавање на страничната гранка, се зголемува загубата при пренесување на звучниот притисок во затворената средина, бидејќи патеката на струење на звучниот притисок се дели на два дела, кон излезот на каналот, но и делумно се враќа и кон примарниот извор на звук. Ова резултира во намалување на звучната енергија и промена на протокот на воздухот како флуид.

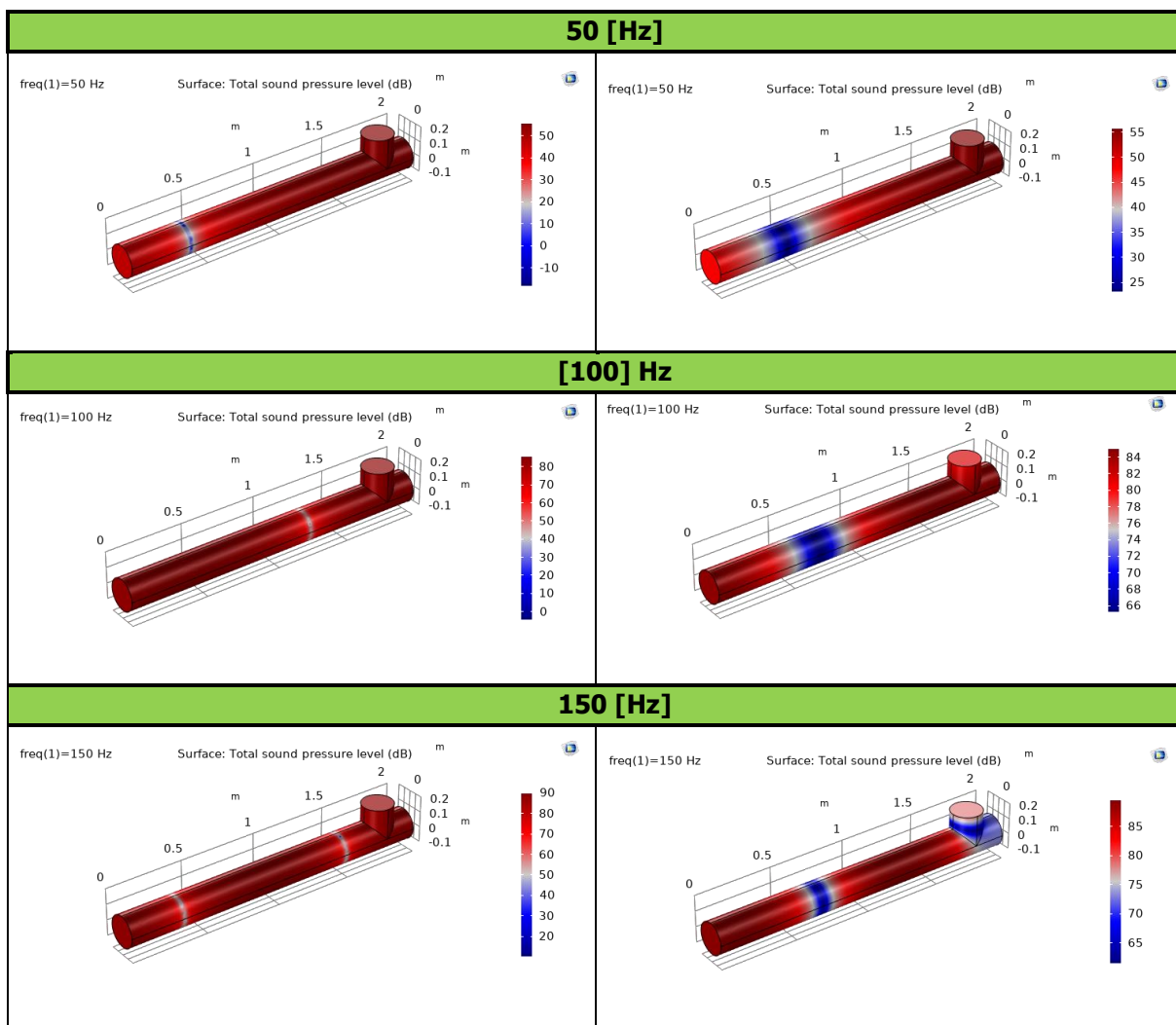
Од друга страна, резултатите за нивото на звучен притисок на примарниот и секундарниот извор, како и на излезот од каналот водат кон заклучок дека улогата на секундарниот извор на звук како основа за исполнување на физичките услови за примена на активната контрола на звук има функција во рангот на фреквенции до 800 [Hz], додека над таа фреквенција нивото на звучен притисок значително се зголемува. Ова е земено во предвид како индикатор за фреквентниот ранг на оптимална функција на активната контрола на звук во акустична средина со зададените геометриски и физички услови.

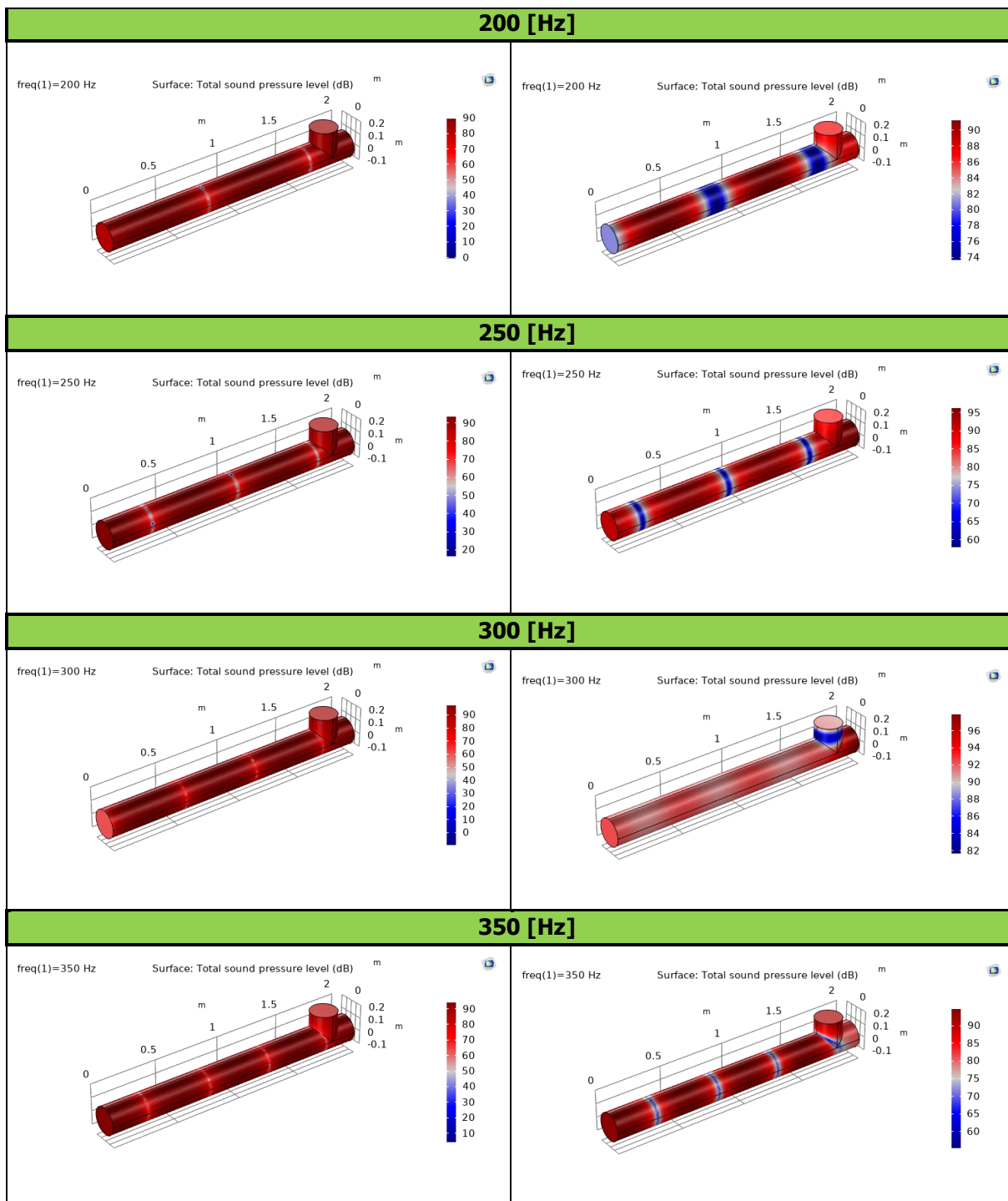
3.2.5. Симулација на акустична средина во канал

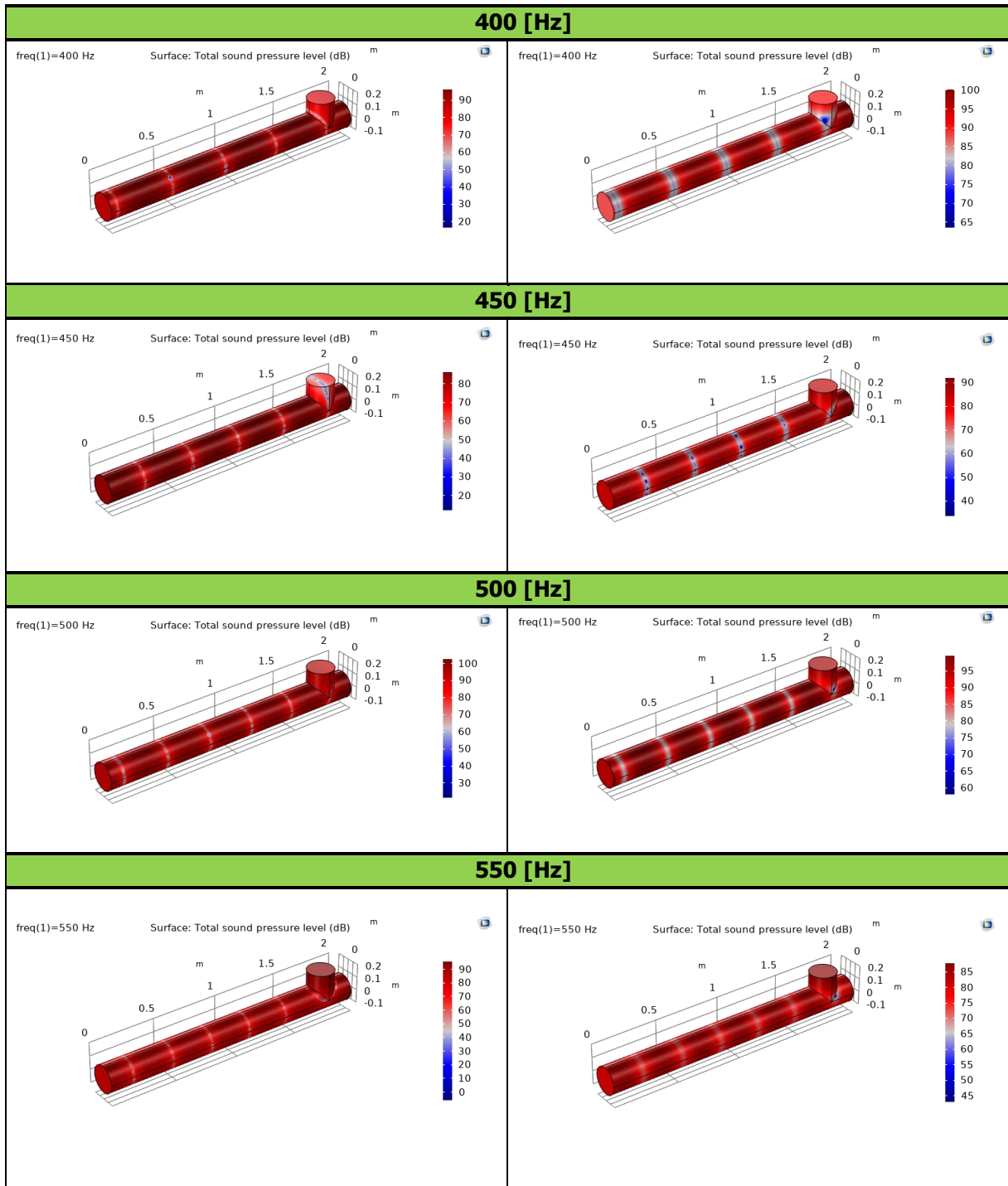
На Слика 3-9 се прикажани резултатите од студијата за фреквентниот домен, во ранг на фреквенции до 1000 [Hz], каде што дисперзијата на нивото на звучен притисок во

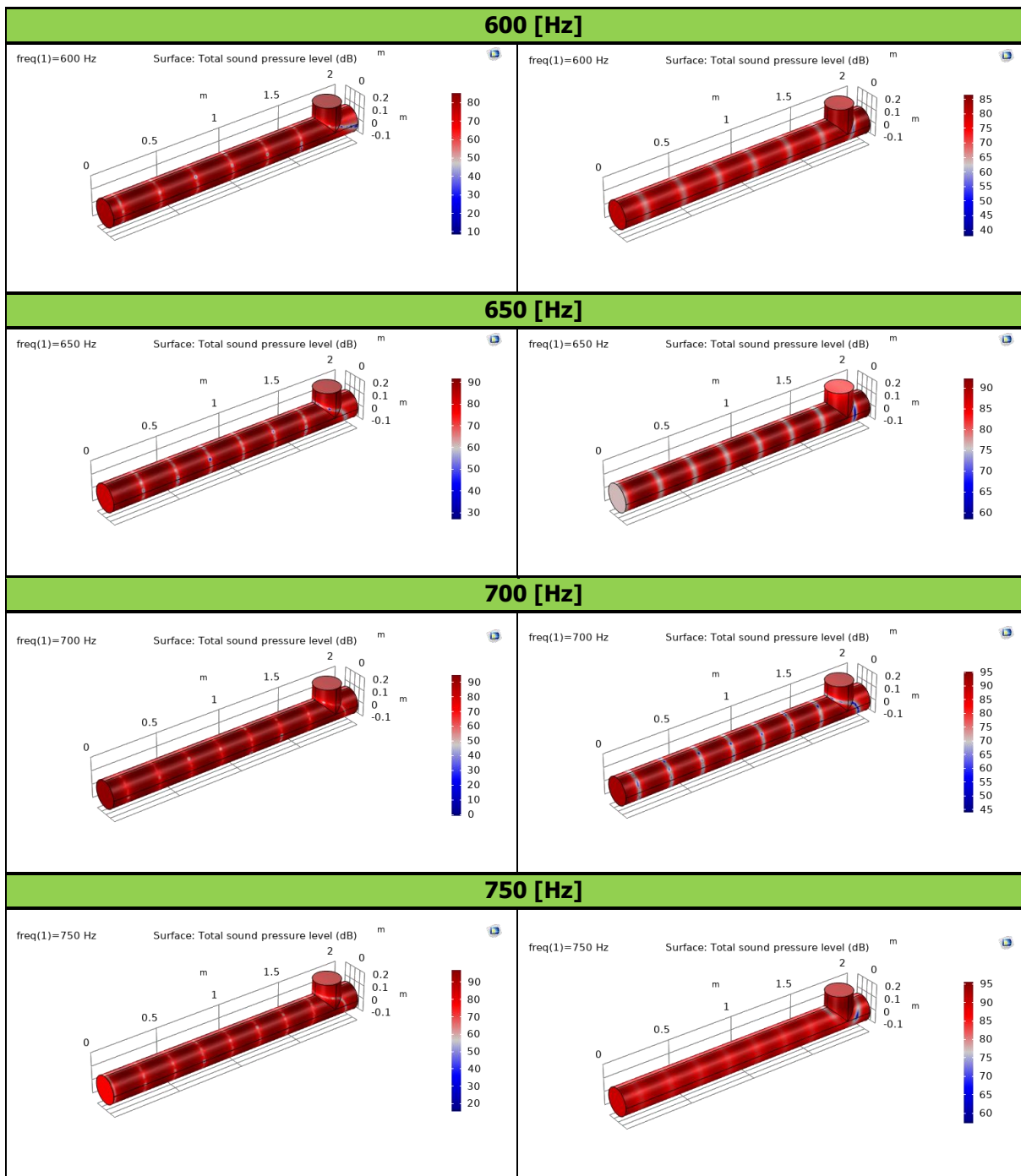
[dB] е визуелизирана со користење на амплитудата на притисокот како почетен услов и влезен параметар во моделот. Првенствено, тоа е спроведено само за примарниот извор на звук (лева колона), и потоа за случајот кога се во функција примарниот и секундарниот извор на звук (десна колона).

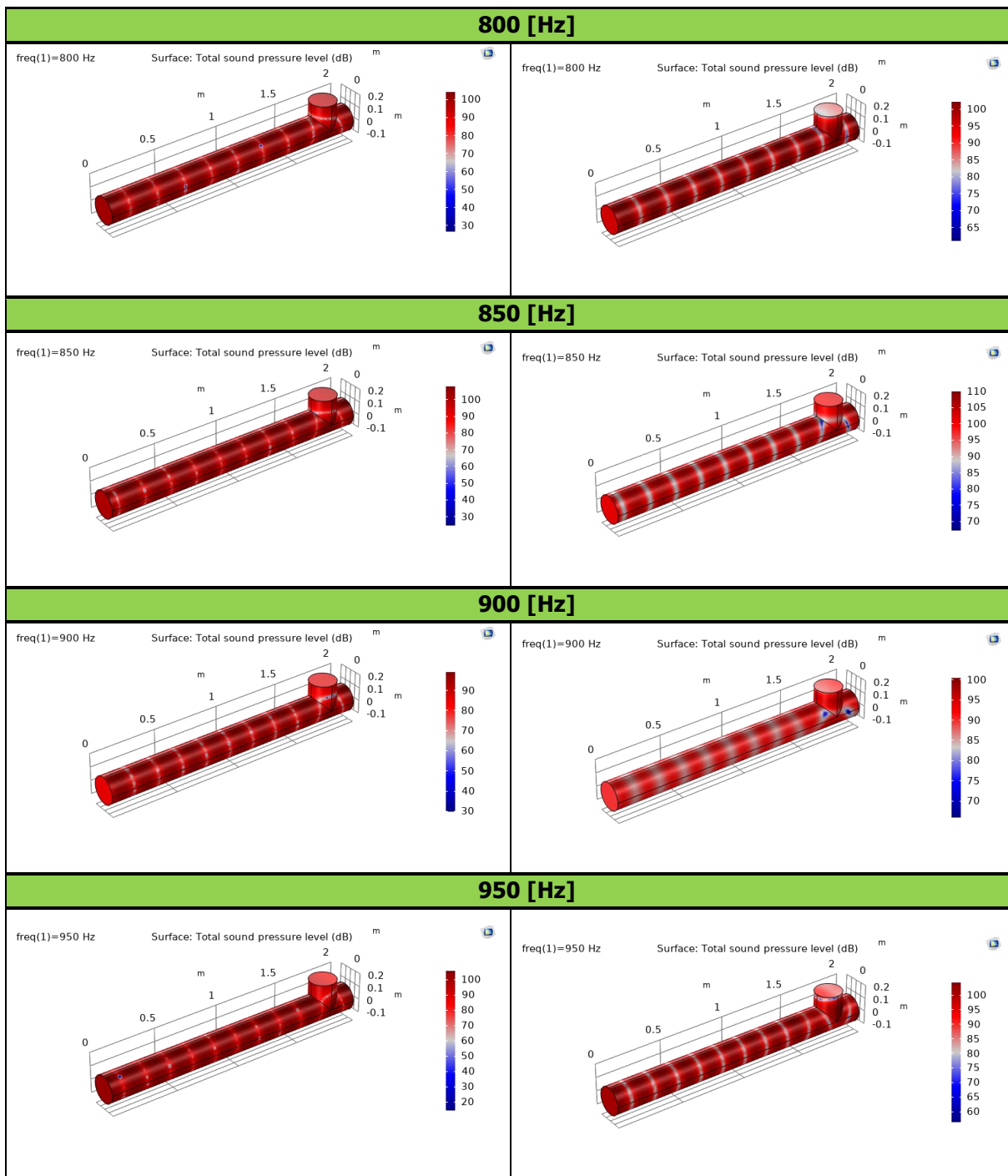
Целта на оваа студија е да се обезбеди визуелно прикажување на дисперзијата на нивото на звучен притисок низ геометријата на каналот пред и по користење на контролен извор на звук од страничната гранка во системот. Согласно резултатите од симулациите прикажани на Сликата 3-9, се обезбедува визуелен лесно препознатлив увид во влијанието на дополнителниот звучен извор во страничната гранка на целокупната акустична состојба во каналот. Истовремено, целта е евидентно да се покаже планарното ширење на звучните бранови, нивната интерференција во рамнината на пресекот и дисперзијата на притисокот на воздухот кон гранките на каналот, резултирајќи во зголемено или намалено звучно ниво на излезот од каналот.

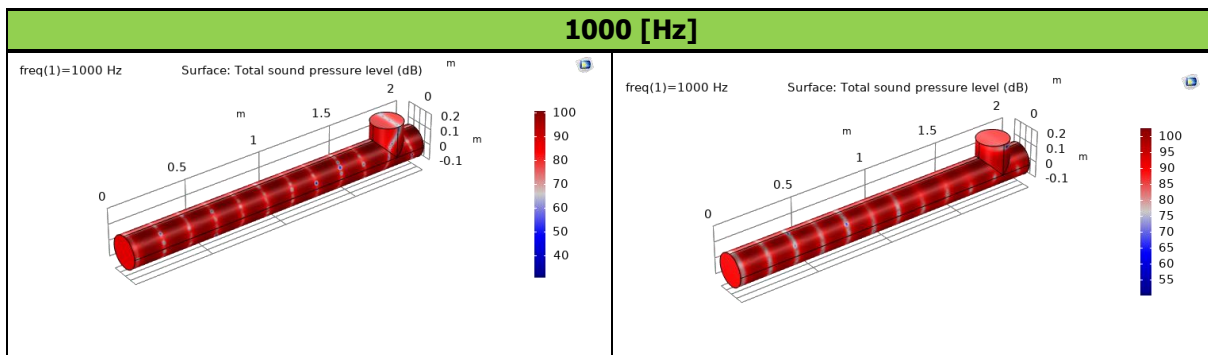












Слика 3-9: Ниво на звучен притисок пред (колона лево) и после вклучување на контролниот извор на звук (колона десно)

Согласно физиката на звучна дисперзија, кога бранот ќе стигне до крајот на каналот, тогаш се случува промена во импедансата поради промената на звучниот притисок од затворена средина во слободна отворена средина. Ова предизвикува промена во патеката и ширењето на бранот што резултира во рефлексија или одбивање на бранот назад во каналот. Ова сценарио има очигледни импликации на текот на акустичната енергија, а тоа може да се забележи од симулацијата на дисперзијата на акустичното поле на Слика 3-9. Дополнително, ова може да влијае и на примена на пристапот на активната контрола на звукот, затоа што во експериментални услови, нивото на звучен притисок на излез од каналот се мери со сензорот кој се наоѓа на излезот од каналот помеѓу затворената и отворената акустична средина. За канал од кој звукот излегува во слободна средина, отпорот (импедансата) е зависна од повеќе параметри, вклучувајќи го напречниот пресек на каналот, должината, карактеристиките на медиумот (воздухот), фреквенцијата на звукот и брзината на воздухот низ цевката.

Во МКЕ анализата на каналот, симулациониот модел покажува ефект на слабеење на акустичниот притисок при возбуда со едноставни хармонични звучни бранови на различните фреквенции (50-1000 [Hz]). Ова е пожелно да се земе предвид пред да се започне со дизајнирање и поставување на техничките аспекти на активниот систем за контрола на звук во канал со овие карактеристики, во однос на параметрите (должина на каналот, дијаметарот, како и растојанието на контролниот извор на звук од примарниот).

3.3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ВАЛИДАЦИЈА НА КАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА АКУСТИЧНАТА СРЕДИНА ВО КАНАЛ

Со цел валидација на резултатите добиени од МКЕ анализата за дисперзијата на звучното поле внатре во каналот и определување на физичките услови за примена на активна контрола на звук во канал со определена геометрија и карактеристики, спроведени се и експериментални лабораториски мерења на системот. Геометријата и

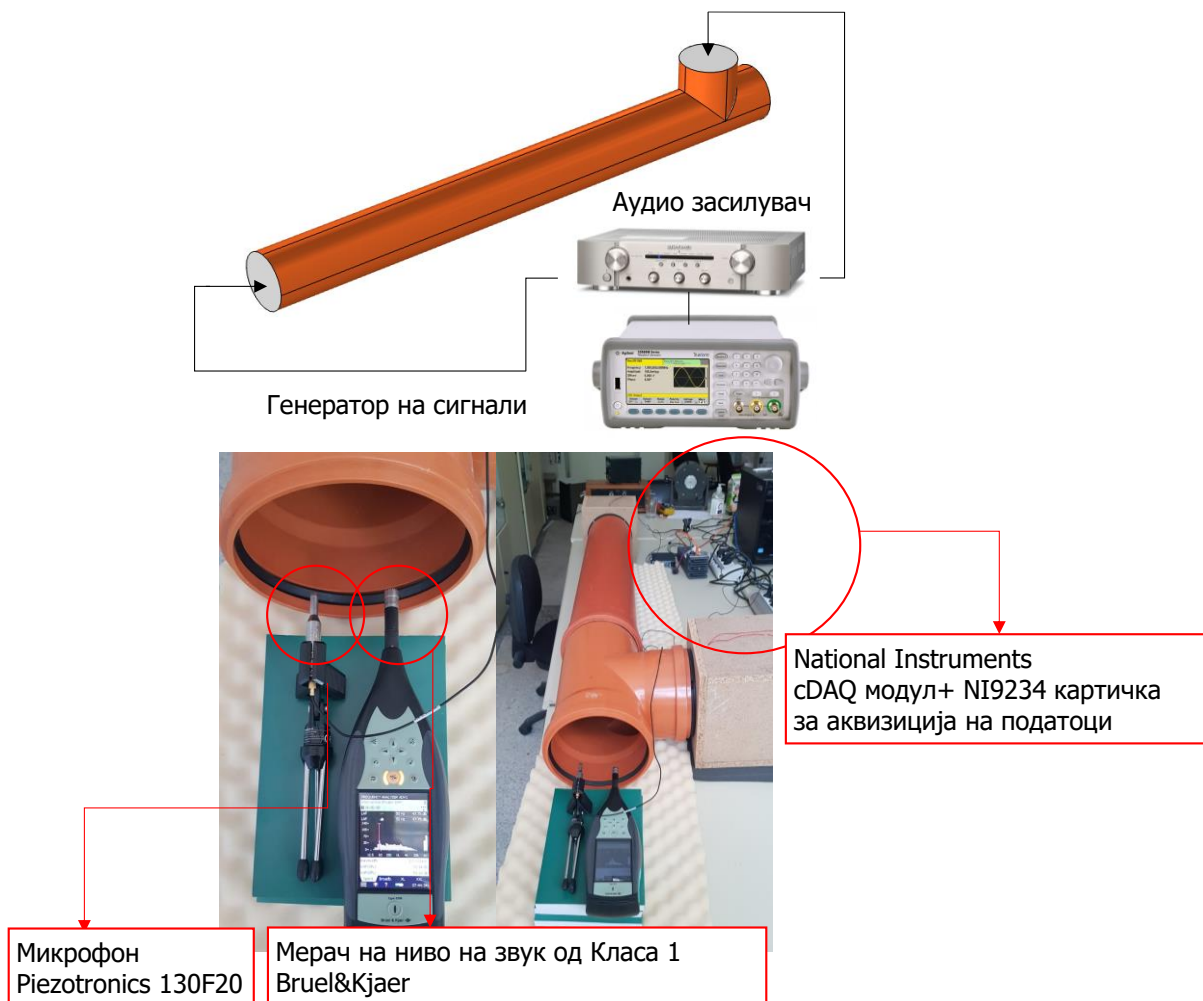
физичките карактеристики на моделот на канал се идентични и во експерименталниот модел, додека моделираните извори на звук во облик на мембрани кои генерираат акустичен притисок, во експерименталниот модел се претставени со два звучници. Методологијата за задавање и мерење на параметрите од интерес за акустичната средина во каналот е опишана подолу.

3.3.1. Методологија

Во првата фаза, мерењата се спроведени на начин што на едниот крај на каналот е поставен звучник на кој преку сигнален генератор се доведени фреквенции со чисти бранови форми (синусоиди) со еднаква амплитуда. Овие фреквенции со определена амплитуда предизвикуваат промена на воздушниот, а со тоа и акустичниот притисок поради осцилациите на мембраната од звучникот. Промените на акустичниот притисок беа мерени блиску до примарниот звучник, како и на излез од каналот. Покрај примарниот звучник, поставен е и секундарниот (контролен) звучник на дополнителната странична гранка на каналот. Неговата функција е преку контролиран притисок на својата мембрана, со однапред зададени чисти синусоидни тонови, но со спротивна фаза од примарниот звучник да го симулира ефектот на секундарен звучник кај активната контрола на звучна средина. Фреквенциите се менувани во рангот од 50 до 1000 [Hz], со цел да се обезбеди споредбеност со резултатите од МКЕ анализата. Со оглед на тоа што брановите кои се генерираат од звучниците се чисти синусоидни форми, а се поместени на физичко растојание од изворот на звукот до сензорот за мерење на звукот, имајќи ги во предвид физичките својства на брановите, кај нив ќе се јавува фазно поместување, кое на излезниот дел од цевката резултира во намалување или зголемување на звучното ниво. Интензитетот на амплитудата на генерираните чисти тонови, независно од нивната фреквенција е одржан константен, односно 0.2 [V] во текот на целото мерење. На овој начин, со определување на максималниот, односно минималниот звучен интензитет на звучното поле кој ни е од интерес за активната контрола на звук, може да се добие увид во екстремите до кои може да се изврши контролата на интензитетот на звучното поле внатре во цевката, односно да се донесат заклучоци за можностите на потенцијалниот систем за активна контрола од аспект на рангот на фреквенции и големината на амплитудите на кои тој може да покаже задоволителни перформанси.

3.3.2. Применета инструментација

За доведување на звучниот притисок на влез во каналот како примарен извор, како и на страничната гранка на каналот како контролен извор, користени се звучници од типот VISATON W200 – 8 Ω со дијаметар од 0,2 [m] и импеданса од 8 [Ohm], чиј ранг ги опфаќа ниските фреквенции над 20 [Hz]. Примарниот и секундарниот звучник се со контролирани амплитуда и фреквенција од сигнален генератор, чиј сигнал се зголемува преку звучен засилувач пред да биде доведен до звучниците.



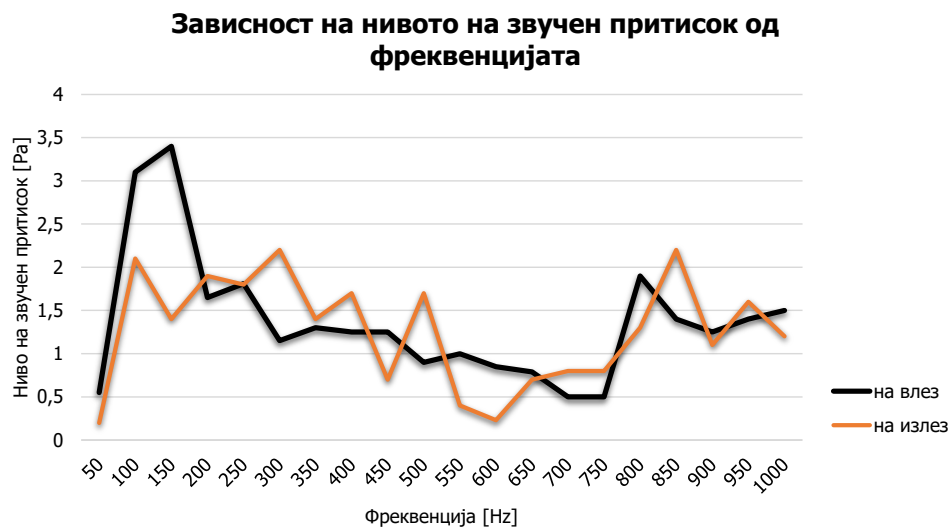
Слика 3-10: Шема на применета инструментација за експериментален модел

За мерење на звучниот притисок на излез од каналот, искористен е микрофон Piezotronics 130F20 кој спаѓа во класата IEPЕ сензори, а чиј сигнал беше визуелизиран во LabView програмскиот пакет, со користење на cDAQ модулот и NI9234 картичка за аквизиција на податоци. Исто така, на излез од каналот поставен е и мерач на ниво на звук Bruel&Kjaer од Класа 1 за определување на звучното ниво во [dB], како и фреквентниот спектар на звучното поле.

3.3.3. Резултати од спроведените мерења

Нивото на звучен притисок измерено од микрофонот, како и параметарот за ниво на звук L_{AF} кој претставува индикатор за максималното ниво на звукот измерено од инструментот за мерење на ниво на звук, мерени се експериментално за ранг на фреквенции од 50 до 1000 Hz со чекор од 50 Hz. Мерењата се извршени со времетраење потребно за секоја од фреквенциите да ја достигне максималната, односно минималната вредност за нивото на звук во [dB], додека интензитетот на амплитудата на звучните

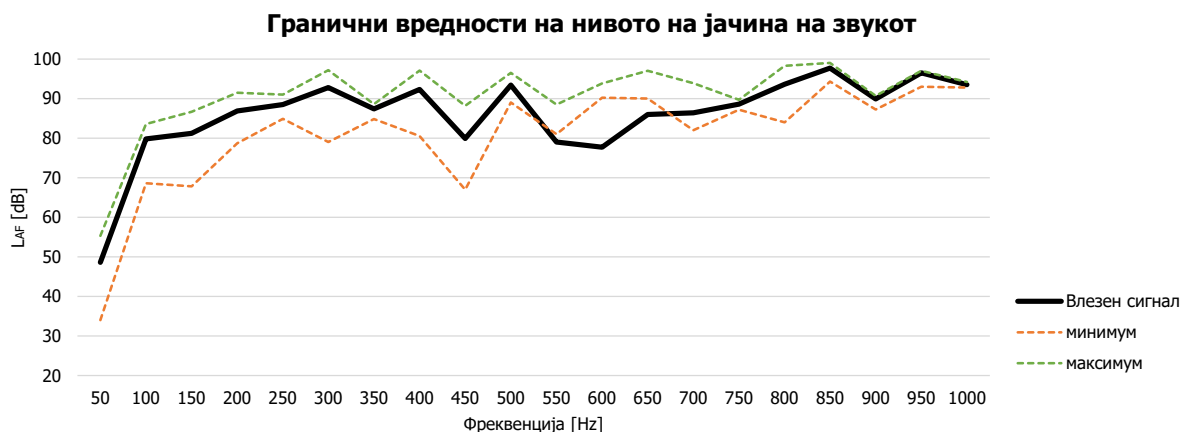
бранови генерирани од сигналниот генератор беше еднаков во текот на сите мерења, 0.2 [V]. Излезната амплитуда од сигналниот генератор од 0.2 [V] резултираше во различни звучни притисоци генерирани од мембраната на звучникот на различни фреквенции. Резултатите од измерените притисоци генерирани на примарниот звучник се прикажани на графикот на Слика 3-11 со црна линија. Со портокалова линија на графикот на Сликата 3-11 е прикажан звучниот притисок кој е измерен на различни фреквенции на излез од каналот.



Слика 3-11: Ниво на звучен притисок на влез и на излез од каналот

Резултатите од измереното звучно ниво со мерачот на звук се прикажани на графикот на Слика 3-12. Со црна линија се дадени вредностите на излез од каналот измерени во [dB] од примарниот сигнал, односно кога е вклучен само примарниот звучник. По вклучување на вториот звучник од споредната странична гранка, беше забележано дека нивото на звук на излез од каналот варира во текот на времето од една минимална до друга максималната вредност, во различни временски периоди во зависност од фреквенцијата. Тоа се должи на физичкото растојание на кое се наоѓаат звучниците до излез од каналот, како и на нивното меѓусебно растојание кое доведува до промена на фазата на бранот во текот на времето.

Од интерес за понатамошната примена, како и определување на техничките и физичките гранични вредности и услови за примена на активната контрола се минималните вредности кои се отчитани од мерачот на звук. Имено, од тука, може да се заклучи дека вредностите кои се добиени за минимални вредности од мерењето, всушност претставуваат вредности кои би можел физички систем со зададените карактеристики да ги постигне при имплементација на активната контрола на звук.



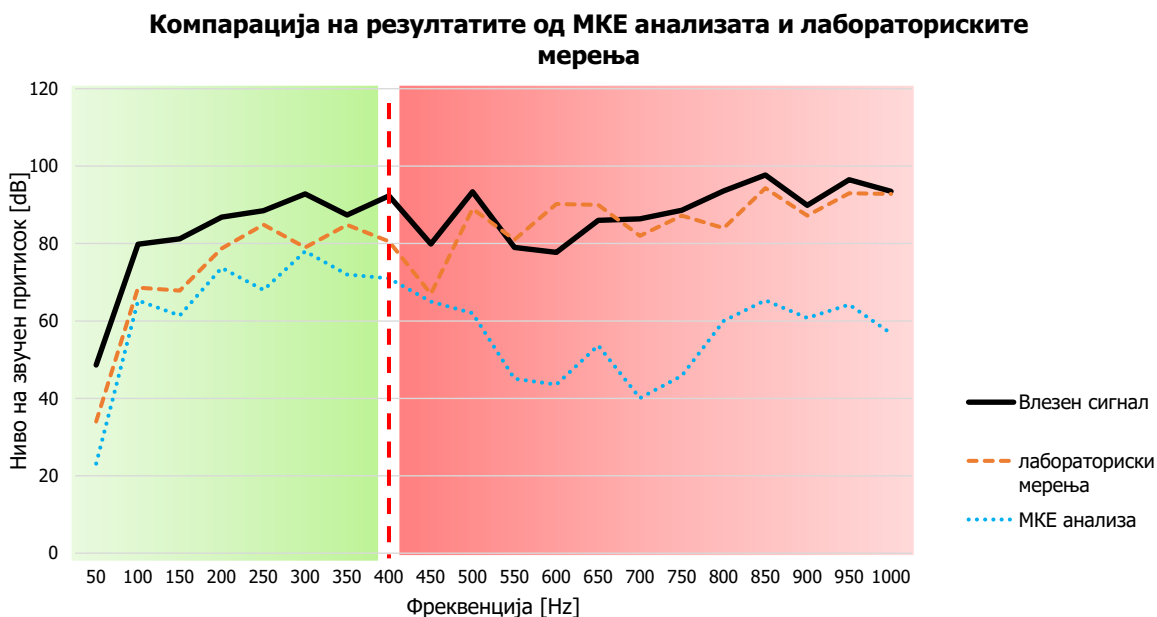
Слика 3-12: Гранични вредности на нивото на јачина на звукот

Очигледно е дека на фреквенциите од 600 до 650 [Hz], минималните вредности ги надминуваат номиналните вредности измерени во [dB] за нивото на звук, и над тие фреквенции разликата помеѓу минималните вредности, номиналните, но и максималните е многу мала. Ова сугерира дека за фреквенции повисоки од 600 [Hz], системот покажува физички и геометриски ограничувања за постигнување на намалување на звукот на излез од каналот.

3.4. ЗАКЛУЧОЦИ ОД СПРОВЕДЕНИТЕ АНАЛИЗИ

Во ова поглавје се претставени аспектите на МКЕ моделирањето и симулацијата на концептот на активен систем за контрола на акустична средина во канал, земајќи ја предвид физиката на дисперзија на звукот во таков систем, како и техничките барања кои треба да се задоволат за успешно да се контролираат акустичните услови во внатрешноста на избраната геометрија на каналот. Експерименталното моделирање преку изградба на систем за активна контрола на акустичната средина е нова техника што се појавува и голем потенцијал за примена во многу современи апликации. Со помош на софтверско моделирање се утврдуваат ограничувањата во перформансите при апликација на системот за активна контрола, како и потребните технички прашања со цел да се обезбедат соодветни услови за ефективна имплементација на истиот.

Преку спроведените експериментални мерења, целта беше да се изврши валидација, но и споредба на резултатите од МКЕ анализата и експерименталните резултати. На графикот на Слика 3-13 се дадени компаративните резултатите за звучното ниво на влез од каналот (од примарниот звучник), како и звучните нивоа на излез од каналот определени преку спроведување на двата методи, МКЕ анализа и експерименталните мерења.



Слика 3-13: Споредба на нивоа на звучен притисок од МКЕ анализата и лабораториските мерења

Согласно прикажаното, може да се заклучи дека според МКЕ анализата се забележуваат помали звучни нивоа по вклучување на вториот звучник со кој се симулира активната контрола, отколку звучните нивоа добиени при експерименталното мерење. Ова може да се должи на неколку аспекти кои се сметаат за предности на идеалната моделирана и симулирана средина во споредба со реалниот физички експериментален модел. Имено, неизбежно е да се истакне дека мембраната преку која се симулираат осцилациите кои предизвикуваат промена во звучниот притисок на звучниците кај МКЕ методот е симулирана како рамна површина додека, во реалноста кај звучниците при експерименталното мерење, таа не е целосно планарна. Поради тоа, во реалноста брановите кои се шират низ каналот се генерираат од мембраната на звучникот која не е рамна, што доведува до промена на звучниот притисок и интензитетот на звучниот бран во рамнината на планарните бранови, правејќи ги нецелосно рамнински.

Друг аспект кој треба да биде земен во предвид претставуваат неидеалните врски на физичкиот модел на каналот помеѓу едниот дел од каналот кој е прав и делот каде е додадена страничната гранка, како и неидеалната врска помеѓу звучниците и каналот. На овие места, доаѓа до минимално, но сепак присутно губење на звучната енергија што резултира во послаби резултати на експерименталниот метод во споредба со МКЕ методот развиен во софтвер со идеални врски.

Во секој случај, она кое што генерално може да се заклучи по спроведувањето на двата методи е дека, базирајќи се на физичките и геометриските својства на каналот, овој систем покажува ограничувања на користење на методот за активна контрола на звукот на фреквенции до 400 [Hz], каде има приближно поклопување на резултатите согласно двата методи. Над фреквенцијата од 400 [Hz] се забележуваат промени во

вредноста на излезното ниво на звучно поле кај експерименталните резултати, резултирајќи и во зголемени звучни нивоа, кое не е својствено за систем на кој е аплицирана активна контрола на звукот.

Генерално, може да се заклучи дека дизајнот на систем за активна контрола на звук вклучува разгледување и исполнување на неколку различни акустични цели во насока на оптимизација на акустичниот систем. Физичкиот дизајн ги одредува најдобрите можни перформанси што може да ги постигне системот за активна контрола на звук. Резултатите од МКЕ анализата, како и експерименталната валидација на истата и согледувањата од резултатите од двата методи ќе послужат како показател и насока на она кое треба да биде земено во предвид и експериментално испитано преку примена на активна контрола на истиот систем со имплементација на контролни алгоритми.

4

МОДЕЛИРАЊЕ И СИМУЛАЦИЈА НА СИСТЕМ ЗА АКТИВНА КОНТРОЛА НА ЗВУК СО ПРИМЕНА НА АДАПТИВНИ АЛГОРИТМИ

Во реалните апликации, сигналот претставува стохастички и динамички променлив процес каде што изведбата на техниката за активна контрола на бучавата воглавно зависи од прецизното определување на фазата, амплитудата и фреквенцијата како карактеристики на примарниот сигнал. Во изминатите две децении, активното поништување на сигналот во обработката на сигналот ефективно се реализира преку развојот и примената на адаптивни алгоритми и системи за обработка на дигитален сигнал [175].

Со цел да се обезбеди динамично следење на сигналот во нестационарни и временски променливи услови, адаптивните алгоритми имаат карактеристики на самомодифицирање на нивниот фреквентен одговор со цел да го променат однесувањето навреме и да го приспособат одговорот на промената на карактеристиките на влезниот сигнал [176]. За разлика од непроменливите филтри, адаптивните филтри бараат мало или речиси никакво предзнаење за влезниот сигнал, а згора на тоа, имаат можност за адаптивно следење на сигналот во нестационарни околности. Во оваа насока, може да се користат различни пристапи со цел да се пресмета најдобриот активен алгоритам за поништување на звукот до саканата апликација, со различни одговори за различни алгоритми [177]. Тоа значи дека секој алгоритам има свои предности и недостатоци, во зависност од апликацијата. При примена на адаптивните алгоритми во активната контрола на сигналот, контролерот треба да биде способен да ги следи варијациите кои може да бидат генерирани во акустичното поле како промена во фазата, амплитудата или преносните функции [178].

Во ова Поглавје е презентираан систем за аквизиција на аудио сигнали со користење на контролен и аквизиционен модул на National Instruments, на кои сигнали понатаму е применет метод за аналитичко моделирање на активна контрола на звук во MATLAB/Simulink. За реализација на активната контрола на звукот е применет

аналитички модел на адаптивно филтрирање преку примена на три адаптивни алгоритми, а заклучоците се претставени преку компаративна анализа на добиените резултати од спроведената методологија. Со цел да се обезбеди споредливост и услови за анализа на адаптивниот процес, потребно е аудио датотеките кои се испитувани да го задоволат условот за кохеренција, па затоа референтната аудио датотека која е одбрана ги содржи секоја од фреквенциите кои се од интерес. Анализата на карактеристиките и резултатите на секој од трите испитувани адаптивни филтри ќе биде извршена согласно следните параметри:

- **Средна квадратна грешка:** Средна квадратна грешка е мерка која индицира колку добро системот може да се адаптира на дадените влезни параметри и посакуваниот сигнал. Колку е помала оваа грешка, толку моделот е попрецизен, а во спротивно, постои индикација дека адаптивниот филтер не може точно да го моделира дадениот систем.

- **Брзина на конвергенција:** Адаптивните филтри ги оптимизираат коефициентите на филтерот за да ја минимизираат грешката во сигналот итеративно. Процесот на минимизирање на грешката се нарекува конвергенција. Брза конвергенција е индикатор дека на адаптивниот филтер му е потребно пократко време да ги пресмета коефициентите на филтерот кои го минимизираат сигналот на грешка.

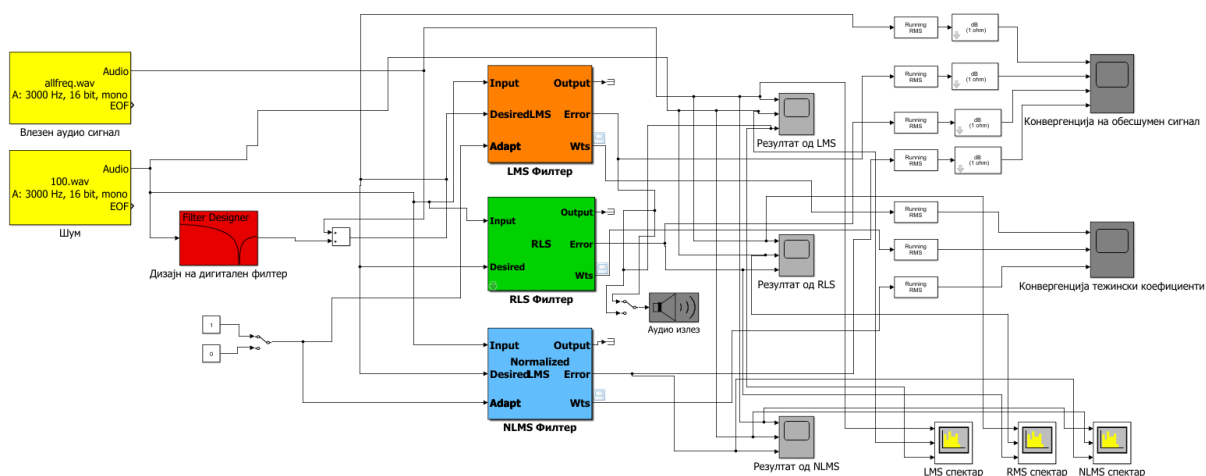
- **Стабилност и робусност:** Параметарот за стабилност дава објаснување колку е стабилен адаптивниот систем за намалување на сигналот. Стабилноста на адаптивниот систем е една од најважните мерки за перформансот на адаптивниот систем и е тесно поврзана со останатите параметри. Робусноста на системот е директно поврзана со стабилноста на системот. Робусноста може да се дефинира како мерка колку добро системот може да се справи со влезниот референтен сигнал.

4.1. АНАЛИТИЧКО МОДЕЛИРАЊЕ НА АКТИВНА КОНТРОЛА НА СИГНАЛ СО КОРИСТЕЊЕ НА MATLAB/SIMULINK

MATLAB претставува комерцијална алатка за моделирање, симулација и анализа на динамички системи, во чии рамки влегува и MATLAB Simulink модулот кој е широко применуван за обработка и анализа на измерените аналогни или дигитални сигнали во динамичките системи. Simulink моделот за активно поништување на звук демонстриран во ова Поглавје се состои од главен модел, во кој како подсистем е дизајниран системот за адаптивно филтрирање на измерените аудио сигнали. Иако овој систем е развиен за поддршка на снимени аудио сигнали со соодветно избрана хардверска поддршка, истиот може да биде имплементиран за аудио датотеки снимени со користење на поинаков хардвер, кое овозможува флексибилност на моделот и можности за негова поширока примена со избор на поинакви уреди за аквизиција на аудио сигналите од интерес.

4.1.1. Модел на системот за активна контрола на аудио сигнал во Matlab/Simulink

Моделот на системот за активна контрола на звук е изграден во Simulink околината на MATLAB 2022a и е сочинет од два измерени аудио сигнали преку системот за снимање на аудио датотеки објаснет подолу, а потоа зачувани како .wav датотеки. Нивната интеграција со системот е прикажана со жолтите блокови на Слика 4-1. Едниот сигнал претставува примарна аудио датотека која е комбинација на чист сигнал и шум, а вториот сигнал е референтен сигнал или сигналот кој е потребно да се отстрани од примарниот снимен сигнал. Блокот кој е претставен на Сликата 4-1 како суматор е искористен со цел да се добие кохеренција помеѓу двата сигнали за олеснување на адаптивната филтрација.



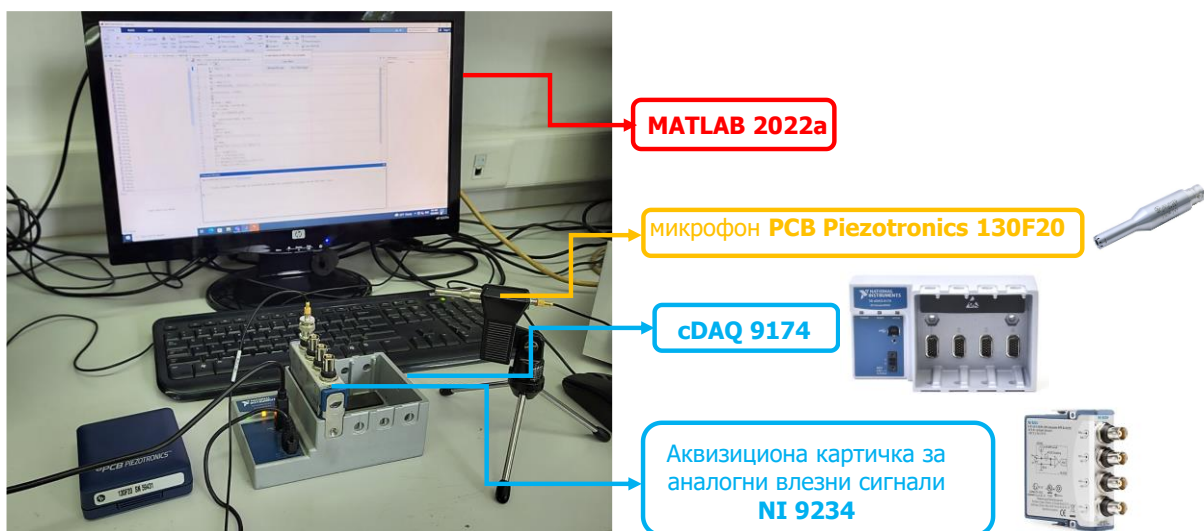
Слика 4-1: MATLAB/Simulink модел на системот за активна контрола на звук

Така процесираниите аудио сигнали се испраќаат до подсистемот за адаптивно филтрирање, каде може да се менува типот на адаптивниот филтер и неговите карактеристики како што ќе биде објаснето подолу. Системот е креиран на таков начин да разликата во влезниот примарен сигнал и референтниот сигнал е „сигналот на грешка“ кој се добива од излезниот порт “error” на блокот за адаптивно филтрирање. Овој сигнал го претставува прочистениот сигнал од каде референтниот звук е отстранет преку адаптивно филтрирање. Блокот на подсистемот за адаптивно филтрирање ги добива двата сигнали во влезните портови, а останатите два порта на влезот во подсистемот се параметарски. Параметарските портови ги специфицираат големината на чекорот на адаптивниот филтер и портот за ресетирање со цел да се овозможи ресетирање на тежинските коефициенти на филтерот кога е потребно. Блокот за адаптивно филтрирање има и три излезни портови. Првиот го репродуцира влезниот примарен сигнал, а вториот порт за „грешка“ ја претставува разликата помеѓу сигналот и влезниот примарен сигнал, односно го дава филтрираниот сигнал. Третиот излезен порт се однесува на приказот на тежинските коефициенти на адаптивните филтри.

Во вака креираниот модел на систем за активна контрола на звук се применети три различни адаптивни филтри LMS, NLMS и RLS со цел проценка на нивните перформанси врз квалитетот на системот и се донесени заклучоци за предностите и недостатоците на секој од нив.

4.1.2. Хардверски систем за аквизиција на аудио датотеки во MATLAB со помош на NI cDAQ 9174 и NI 9234

Библиотека за аквизиција на податоци во Simulink околината на Matlab располага со различни блокови кои овозможуваат интегрирање на реални или снимени аудио сигнали во Simulink моделите. За целите на овој систем за активна контрола на звук, искористен е еден од блоковите за аналоген влез на снимена аудио датотека во .wav format зачуван во датотека.

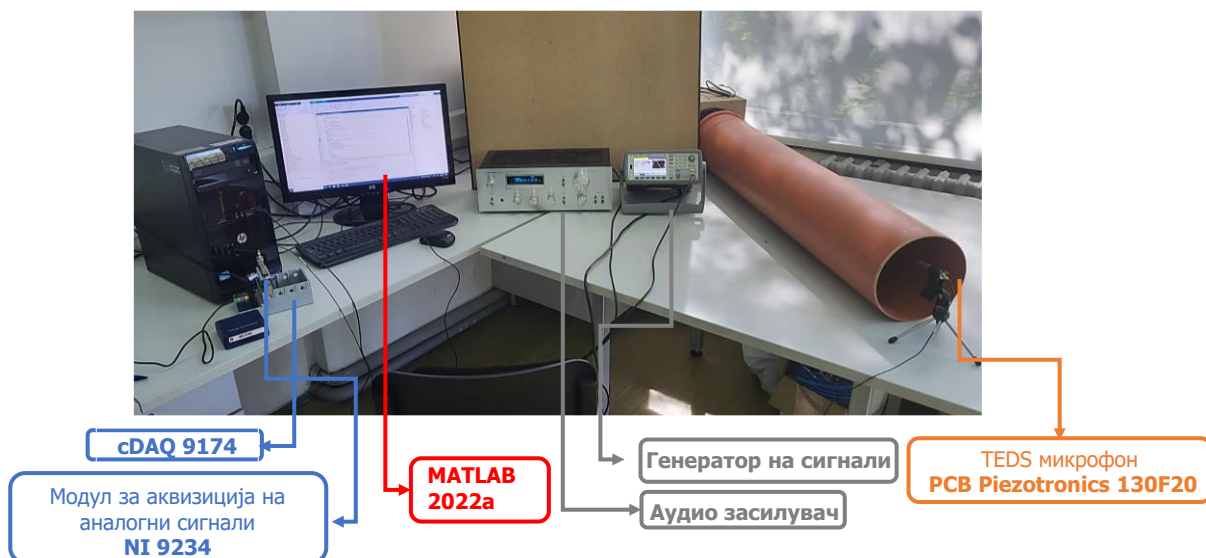


Слика 4-2: Мерна инструментација за аквизиција на аудио сигнали

За мерење и снимање на потребните аудио датотеки, во рамките на овој систем е поставена експериментална мерна инструментација користејќи ги можностите на картичката за аквизиција на аналогни сигнали од интегрирани сензори од National Instruments NI 9234, преку cDAQ 9174 шасијата од National Instruments за поврзување на компјутер преку USB комуникација (Слика 4-2). Како сензор за мерење на звучните сигнали беше искористен PCB Piezotronics микрофон од типот 130F20 кој влегува во класата на паметни TEDS сензори, но е компатибилен со хардверските единици за аквизиција на податоци од National Instruments. Измерените аудио сигнали се потоа зачувани како .wav датотеки, кој е формат препознатлив за MATLAB/Simulink.

4.1.3. Имплементација на системот

Системот за мерење и снимање на аудио датотеки преку MATLAB 2022a со помош на cDAQ 9174 и NI 9234 кој беше објаснет погоре е интегриран во поширока експериментална поставувања прикажана на Слика 4-3, која послужи за мерење на чисти синусоидни тонови на фреквенции од 100 [Hz] до 1000 [Hz]. Аудио фреквенциите се генерирани со помош на сигнален генератор, а кои преку појачувач на звук и звучник се дисперзираат во акустична средина на канал чии карактеристики беа опишани во Поглавје 3. Чистите фреквенции се снимани во временски интервал од 10 секунди како посебни аудио датотеки, а дополнителна засебна аудио датотека е креирана со мерење на целиот ранг на фреквенции последователно со времетраење од 30 секунди, при што секоја следна фреквенција беше генерирана на секои 3 секунди.

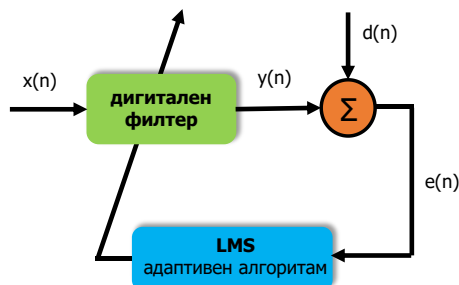


Слика 4-3: Експериментално поставување на потребните хардверски компоненти

Целта е вака добиените аудио датотеки со прецизно контролирани генерирани фреквенции и амплитуди да бидат искористени како познат влезен сигнал на непосакуван звук во системот за активна контрола во MATLAB Simulink моделот. Истовремено, аудио датотеките кои се снимени како комбинација на овие чисти фреквенции со позната фреквентна содржина со други звуци чија фреквентна природа е непозната, ќе послужат како влезни сигнали во моделот кои ќе бидат подложни на прочистување од чистите фреквенции кои интерферираат со примарниот аудио сигнал. На овој начин, со добро познавање на природата на сигналот кој се наоѓа во аудио сигналот ќе се овозможат контролирани и однапред познати карактеристики на акустичната средина, а со тоа и добра основа за проценка на перформансот на системот и неговите составни делови.

4.2. АНАЛИЗА НА ПРИМЕНАТА НА LMS АДАПТИВНИОТ АЛГОРИТАМ

Поради својата едноставност и робусност, најчесто користен алгоритам во апликациите за активно поништување на сигнал е алгоритмот најмали средни квадрати за адаптивно филтрирање на сигналот чија блок-шема е прикажана на Слика 4-4.



Слика 4-4: Блок-дијаграм на адаптивен дигитален филтер со алгоритам на најмали средни квадрати

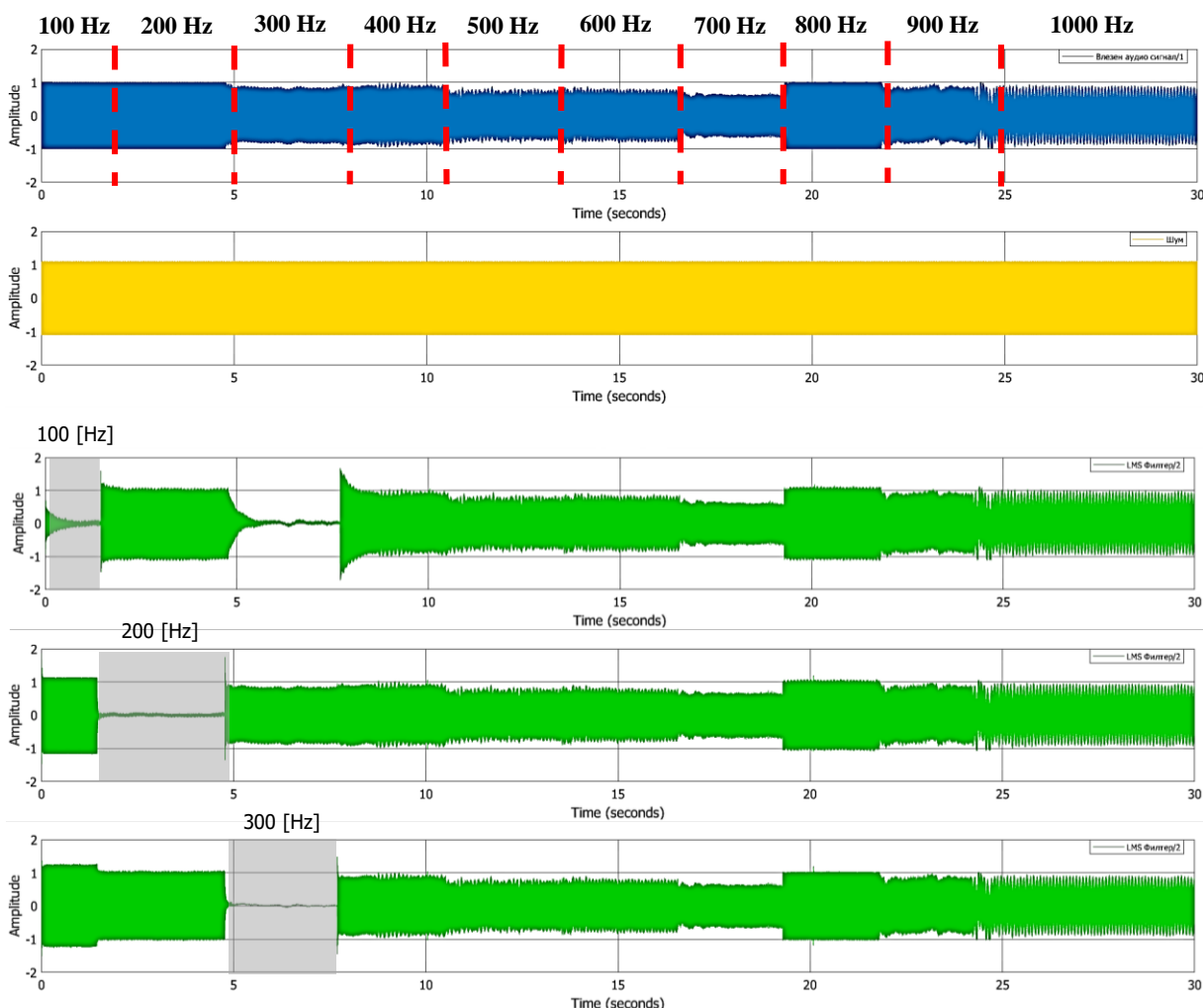
Основна цел на адаптивниот контролен алгоритам на најмали средни квадрати (LMS) е да изврши адаптација на тежинските коефициенти $W[n]$ на дигиталниот филтер, така што разликата, односно грешката $e(n)$ помеѓу излезот на дигиталниот филтер $y[n]$ и посакуваниот сигнал $d[n]$ се минимизира. Блок дијаграм на адаптивниот алгоритам е претставен на сликата. Математичката релација покажува дека проценката на наредниот тежински коефициент $w[n + 1]$ претставува рекурзивен процес, каде моменталната вредност на тежинскиот коефициент $w[n]$ ќе се менува во зависност од големината на корелацијата помеѓу влезниот сигнал на филтерот $x[n]$ и грешката $e[n]$. Параметарот μ претставува чекорот со кој се определува брзината на конвергенција. Поголема вредност на μ води до побрза конвергенција, но исто така и до можноста за прескок на вистинскиот коефициент и до појава на нестабилност на алгоритмот. Мала вредност на μ води до побавна конвергенција и можноста за прескок на вистинскиот тежински коефициент е помала. Примената на адаптивниот филтер LMS зависи од вредностите зададени за должината на филтерот, големината на чекорот μ и факторот на пропуштање.

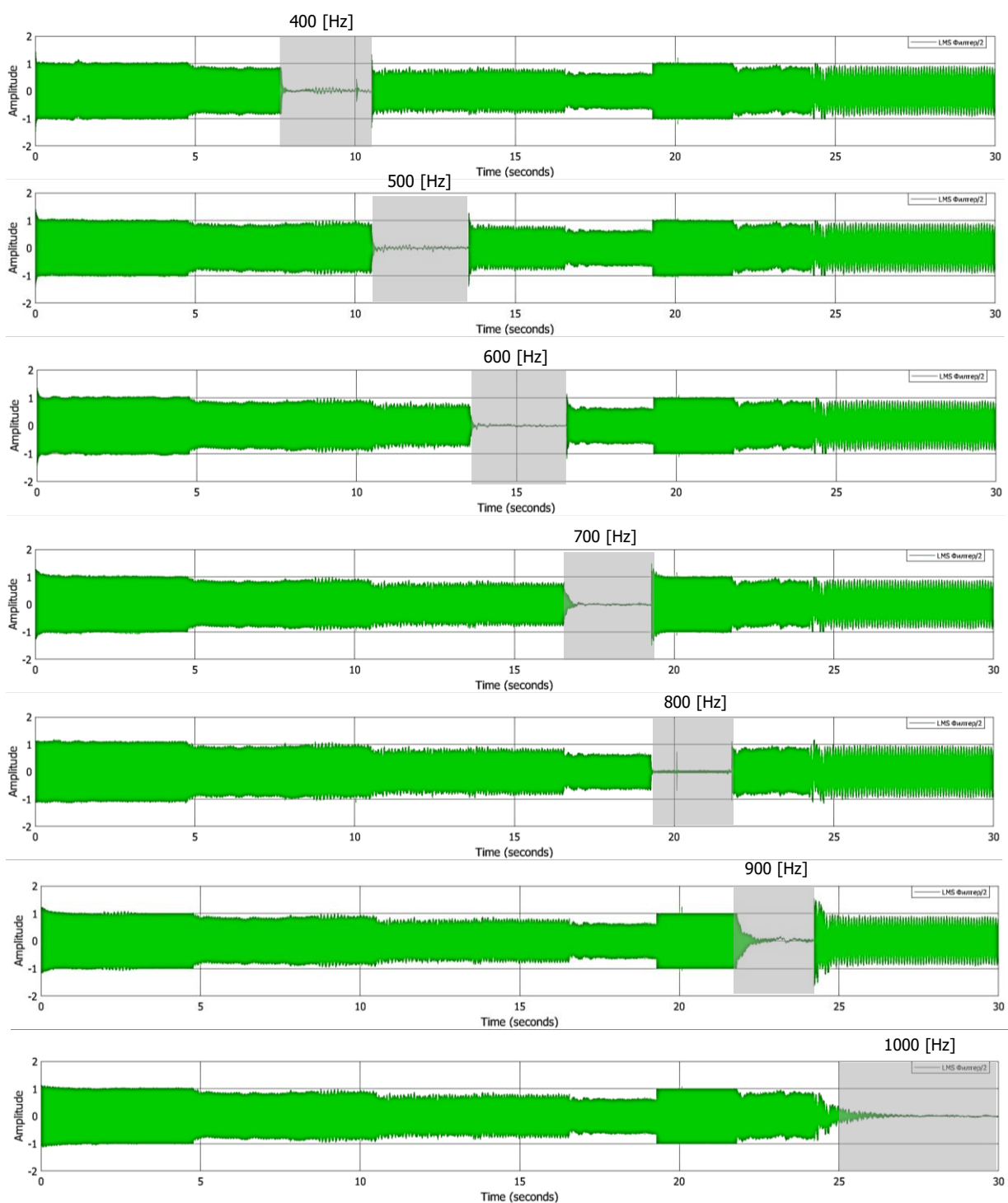
Табела 4.1: Карактеристики на LMS адаптивен филтер

Влез:	Вектор на тежински коефициенти $\vec{w}(n)$, вектор на влезен сигнал $\vec{x}(n)$, и посакуван излез $d(n)$
Излез:	Излез од филтерот $y(n)$, следна итерација за промена на векторот на тежински коефициенти $\vec{w}(n + 1)$
Параметри:	N =број на итерации μ =чекор за брзина на конвергенција
Иницијализација:	Имајќи го во предвид претходниот тежински коефициент, за пресметување се користи $\vec{w}(0)$, во спротивно $\vec{w}(0) = 0$
Чекор 1:	Филтрирање: $y(n) = \vec{w}^T(n)\vec{x}(n)$
Чекор 2:	Проценка на грешка:

	$e(n) = d(n) - y(n)$
Чекор 3:	Адаптација на векторот на тежински коефициенти: $\vec{w}(n+1) = \vec{w}(n) + 2\mu e(n)\vec{x}(n)$

На Слика 4-5 се прикажани амплитудно-временските одговори на системот при различни фреквенции на референтниот звук, за истиот примарен сигнал, односно аудио датотека на која се снимени сите 10 фреквенции. Резултатите прикажани на Сликата 4-5 се за одбрана должина на филтерот 20, големина на чекорот $\mu=0,005$ и фактор на пропуштање=1. Со сино е прикажан временскиот домен на примарниот аудио сигнал, со жолто е прикажан временскиот домен на референтниот звук, а со десетте зелени графичи се прикажани временските домени на аудио сигналот по примената на активната контрола со LMS алгоритмот. Од резултатите може да се забележи дека на секоја од фреквенциите е постигнато значително амплитудно намалување на сигналот во спектарот на соодветната фреквенција, без влијание во останатиот дел од сигналот надвор од временскиот интервал на фреквенцијата која се поништува.

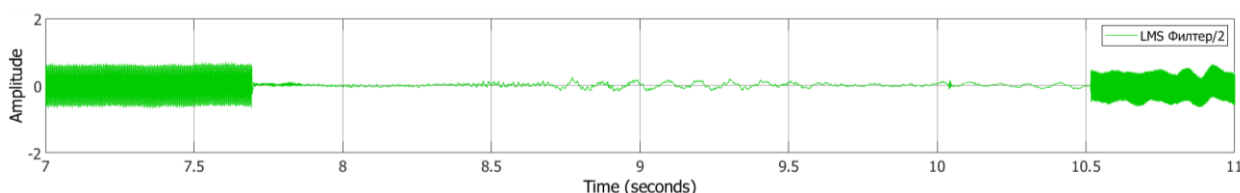




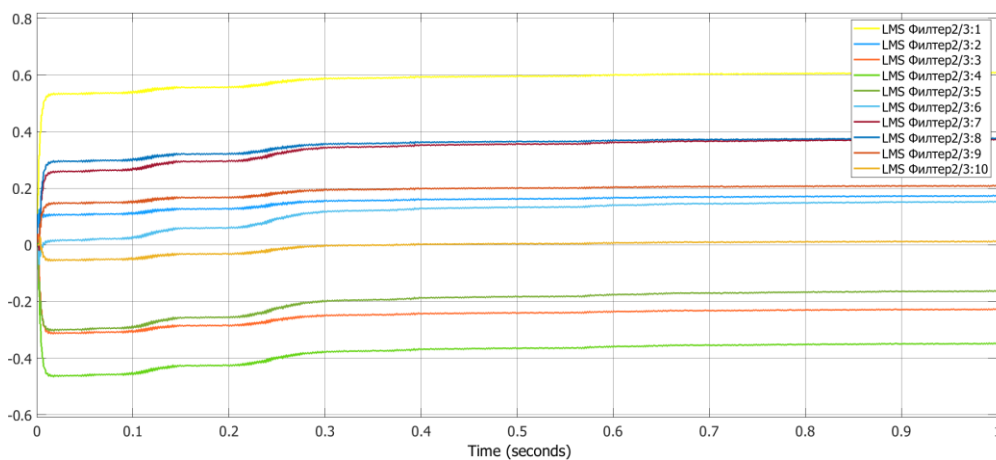
Слика 4-5: Резултати од примена на LMS адаптивниот филтер на 10 фреквенции во временски домен

Големината на чекорот μ влијае на брзината на конвергенцијата на средните вредности на тежинските коефициенти на адаптивниот филтер и на стабилноста на адаптивниот филтер. Во овој случај, за испитување на влијанието на големината на

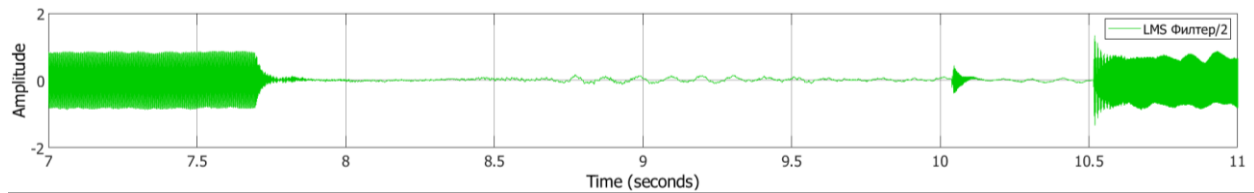
чекорот, вредноста μ беше променета од повисока вредност $\mu=0,09$ во помала $\mu=0,005$. На слика 4-6 е прикажано намалувањето на фреквенцијата од 400 [Hz] во амплитудно-временски приказ со големина на чекорот $\mu=0,09$, додека на слика 4-8 е прикажано намалувањето на фреквенцијата од 400 [Hz] во амплитудно-временски приказ со големина на чекорот $\mu=0,005$. Од прикажаните резултати може да се забележи дека во случајот на поголем чекор $\mu=0,09$, се обезбедува побрза, но помалку прецизна адаптација во споредба со случајот за $\mu=0,005$, каде адаптацијата се одвива побавно, но со поголеми намалувања на амплитудата и поточни резултати. Од друга страна, за поткрепување на овие заклучоци, на сликите 4-7 и 4-9 се дадени графичките прикази на конвергенцијата на тежинските коефициенти за истата фреквенција од 400 [Hz], за соодветните чекори $\mu=0,09$ и $\mu=0,005$. Од овие резултати може да се забележи дека за поголемиот чекор $\mu=0,09$, адаптацијата на филтерот е побрза, но филтрирањето е послабо, за разлика од резултатите при примена на помал чекор $\mu=0,005$, каде се забележува побавна адаптација, но постабилна и побрза конвергенција на тежинските коефициенти на филтерот, а со тоа и подобри резултати во намалувањето на сигналот.



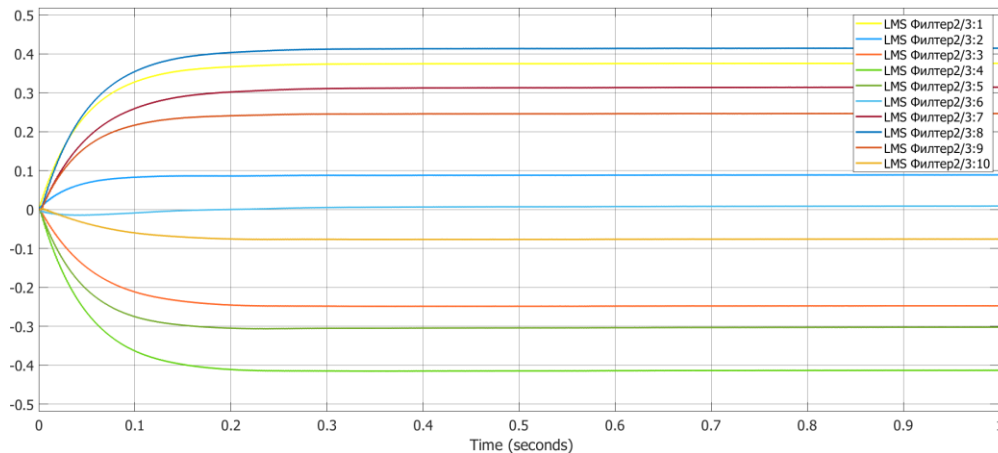
Слика 4-6: Амплитудно-временски приказ на намалување на фреквенцијата од 400 Hz со $\mu=0,09$



Слика 4-7: Конвергенција на тежинските коефициенти на фреквенција од 400 Hz со $\mu=0,09$



Слика 4-8: Амплитудно-временски приказ на намалување на фреквенцијата од 400 Hz со $\mu=0,005$

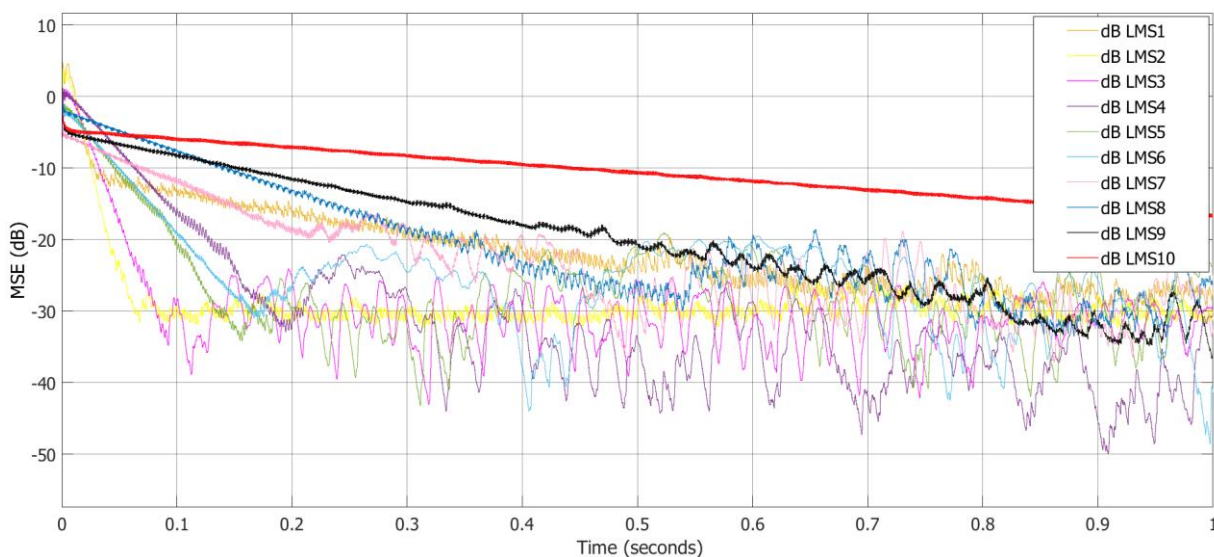


Слика 4-9: Конвергенција на тежинските коефициенти на фреквенција од 400 Hz со $\mu=0,005$

Должината на филтерот е многу важен параметар при дизајнирањето кој влијае на перформансот на целокупниот систем. Должината на филтерот влијае на потребите за пресметковни ресурси на системот, како и на конвергенцијата. Нема математичка пресметка или аналитички начин за правилно определување и избор на должината на филтерот. Вообичаено тоа се прави преку процес на проба и грешка. Во овој случај, должината на филтерот беше променувана додека не беа исполнети барањата и потребите на конкретниот модел за должина на филтерот еднаква на 20. Генерално, беше заклучено дека поголема должина на филтерот бара поголеми пресметковни ресурси и системот работи побавно со помала грешка по постигнување на конвергенција во тежинските коефициенти. Сепак со многу голема должина на филтер таа грешка не може комплетно да се намали. Системот достигнува стабилна состојба кога адаптивниот филтер конвергира и коефициентите на филтерот немаат веќе значителни промени.

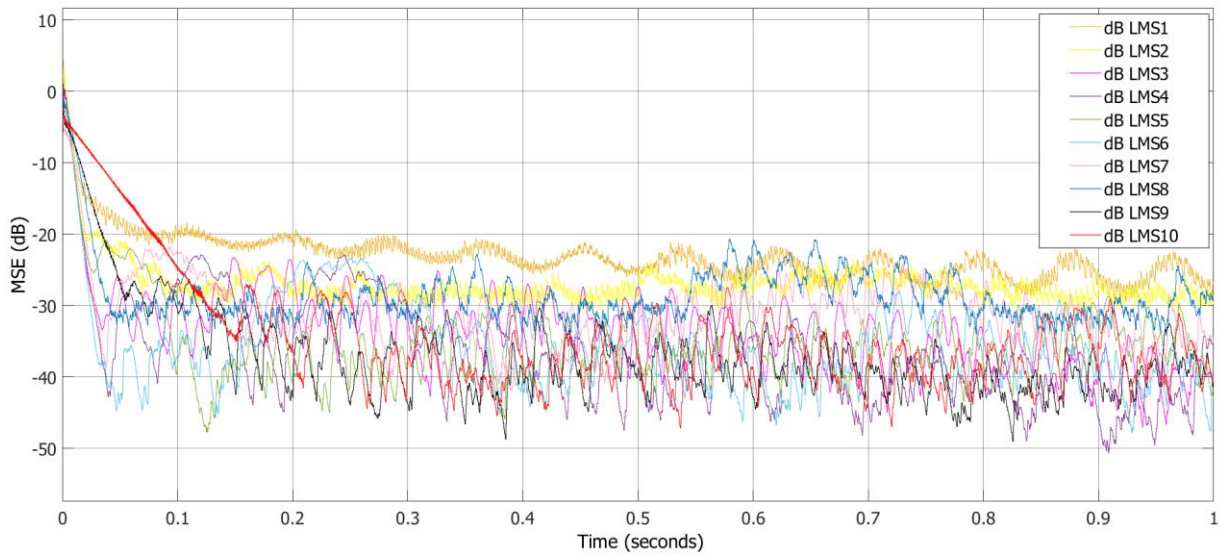
Брзата конвергенција на алгоритмот значи способност да се адаптира брзо на стационарна средина со непозната природа, но конечната вредност на минималната средна грешка нормирана во текот на времето има поголема девијација кога конвергенцијата е побрза. Голема вредност на минималната средна грешка е индикатор дека адаптивниот филтер не може точно да го следи посакуваниот референтен сигнал. Кривата на минималната средна грешка е алатка која помага во подобро разбирање на перформансот на адаптивниот филтер, вклучувајќи ги брзината на конвергенција и стабилноста.

На Сликата 4-10 се прикажани кривите на минималната средна квадратна грешка при примена на LMS адаптивниот филтер за референтниот сигнал на сите 10 фреквенции со чекор $\mu=0,005$. Од сликата може да се забележи дека конвергенцијата на најмалата средна квадратна грешка е најбрза за сигналите со фреквенции 200 [Hz] и 300 [Hz] (жолтата и розовата линија). За 200 [Hz] конвергенцијата е стабилна, има добра прилагодливост и по достигнување на минималната средна квадратна грешка, односно стационарната состојба на -30 [dB] после 0,007 секунди и има мали промени во коефициентите потоа, додека за 300 [Hz] прилагодливоста на алгоритмот е послаба по достигнувањето на стационарната состојба по 0,008 секунди. Од друга страна, конвергенцијата за 800, 900 и 1000 [Hz] е многу бавна, дури фреквенциите од 900 и 100 [Hz] не ја достигнуваат стационарната состојба за 1 секунда. Фреквенцијата од 400 Hz достигнува најмала квадратна грешка од -50 [dB] за 0,9 секунди, но со слаба прилагодливост по достигнувањето на стабилната состојба.



Слика 4-10: Минимална средна квадратна грешка при примена на LMS филтерот на сите 10 фреквенции со чекор $\mu=0,005$

На Сликата 4-11 се прикажани кривите на средната квадратна грешка при примена на LMS адаптивниот филтер за референтниот сигнал на сите 10 фреквенции со чекор $\mu=0,09$. Од сликата може да се забележи дека сигналот на фреквенција од 1000 [Hz] повторно најбавно ја достигнува стационарната состојба после 0,15 секунди со вредност од околу 35 [dB]. Сигналот на фреквенции од 800 и 900 [Hz] исто така покажуваат бавна конвергенција после 0,15, односно 0,14 секунди соодветно. Сите фреквенции освен 100 [Hz], 800 [Hz], 900 [Hz] и 1000 [Hz] ја достигнуваат стационарната состојба после 0,014 секунди, но со различни минимални вредности за средната квадратна грешка. Најголема стабилност во стационарната состојба покажуваат фреквенциите на 100 и на 200 [Hz].

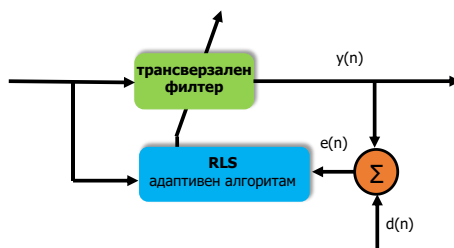


Слика 4-11: Минимална средна квадратна грешка при примена на LMS филтерот на сите 10 фреквенции со чекор $\mu=0,09$

Од сликите 4-10 и 4-11 може да се заклучи дека конвергенцијата на LMS адаптивниот филтер директно зависи од големината на чекорот. Имено, од графициите може да се заклучи дека средната квадратна грешка конвергира побрзо за поголема големина на чекорот 0,09, отколку за помала 0,005 за сите различни фреквенции на сигналот. Од друга страна, прилагодливоста на алгоритмот по достигнувањето на стабилната состојба се намалува со зголемување на големината на чекорот.

4.3 АНАЛИЗА НА ПРИМЕНАТА НА RLS АДАПТИВНИОТ ФИЛТЕР

Во споредба со алгоритмот на најмали средни квадрати, пристапот на рекурзивниот алгоритам на најмали квадрати (RLS) (Слика 4-12), нуди побрза конвергенција и помала грешка на сметка на тоа што бара повеќе пресметки. Патеките и идентификациите на сигналот се исти без разлика дали филтерот користи RLS или LMS алгоритми, а разликата лежи во делот за прилагодување. RLS адаптивниот филтер е алгоритам кој рекурзивно ги наоѓа коефициентите на филтерот што ја минимизираат линеарната функција на најмали квадрати во врска со влезните сигнали. Овие филтри се прилагодуваат врз основа на вкупната пресметана грешка. RLS алгоритмот има предност во брзата конвергенција, но од друга страна, има проблем со високата пресметковна сложеност.



Слика 4-12: Блок дијаграм на адаптивен дигитален филтер со рекурзивен алгоритам на најмали квадрати

Табела 4.2: Карактеристики на RLS адаптивниот филтер

Влез:	Вектор на тежински коефициенти, $\vec{w}(n-1)$, влезен вектор $x(n)$, посакуван излез $d(n)$ и корелациона матрица $\vec{\Phi}_A^{-1}(n-1)$, Влезниот вектор на тежински коефициенти е дефиниран со: $\vec{x}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-M+1)]^T$
Излез:	Излез од филтерот, $y_{n-1}(n)$, промена на векторот на тежински коефициенти $w(n)$, и променетата корелациона матрица во новата итерација $\vec{\Phi}_A^{-1}(n)$
Параметри:	N =број на итерации λ = „фактор на забораване“ δ = мала позитивна константа, каде $0 < \lambda < 1$
Иницијализација:	Имајќи го во предвид претходниот тежински коефициент, за пресметување се користи $\vec{w}(0)$ и $\vec{\Phi}_A^{-1}(0)$, во спротивно $\vec{w}(0) = 0$ и $\vec{\Phi}_A^{-1}(0) = \delta^{-1} \vec{I}$
Чекор 1:	Пресметка на векторот на засилување: $\vec{k} = \frac{\lambda^{-1} \vec{\Phi}_A^{-1}(n-1) \vec{x}(n)}{1 + \lambda^{-1} x^T(n) \vec{\Phi}_A^{-1}(n-1) \vec{x}(n)}$
Чекор 2:	Филтрирање: $y(n) = \vec{w}^T(n) \vec{x}(n)$
Чекор 3:	Проценка на грешката: $e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - \vec{w}^T(n-1) \vec{x}(n)$
Чекор 4:	Адаптација на векторот на тежинските коефициенти: $\vec{w}(n) = \vec{w}(n-1) + \vec{k}(n) e(n)$
Чекор 5:	Промена во $\vec{\Phi}_A^{-1}(n)$: $\vec{\Phi}_A^{-1}(n) = \lambda^{-1} \vec{\Phi}_A^{-1}(n-1) - \lambda^{-1} \vec{k}(n) \vec{x}^T(n) \lambda^{-1} \vec{\Phi}_A^{-1}(n-1)$

Функцијата на тежинските коефициенти за овој алгоритам е дадена со релацијата:

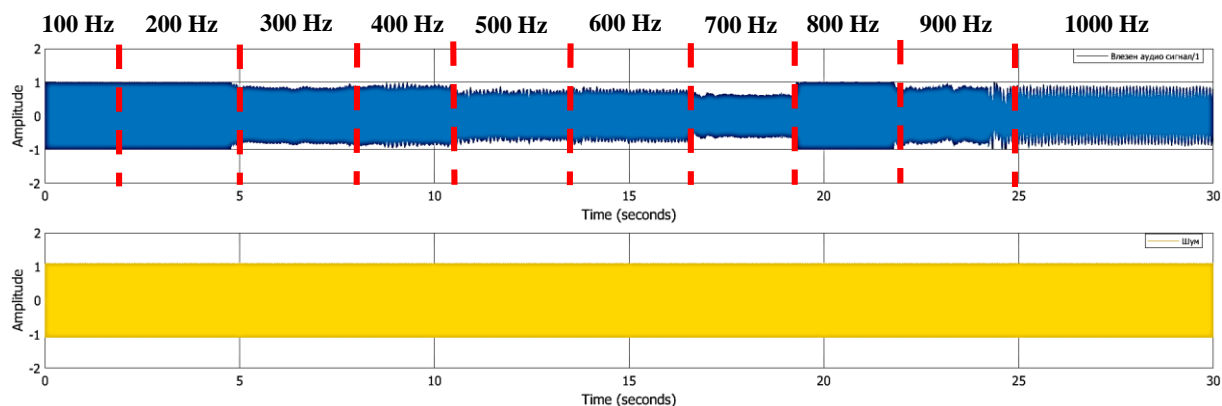
$$J(n) = \sum_{i=0}^k \lambda^{n-i} e^2(n) \quad (4.1)$$

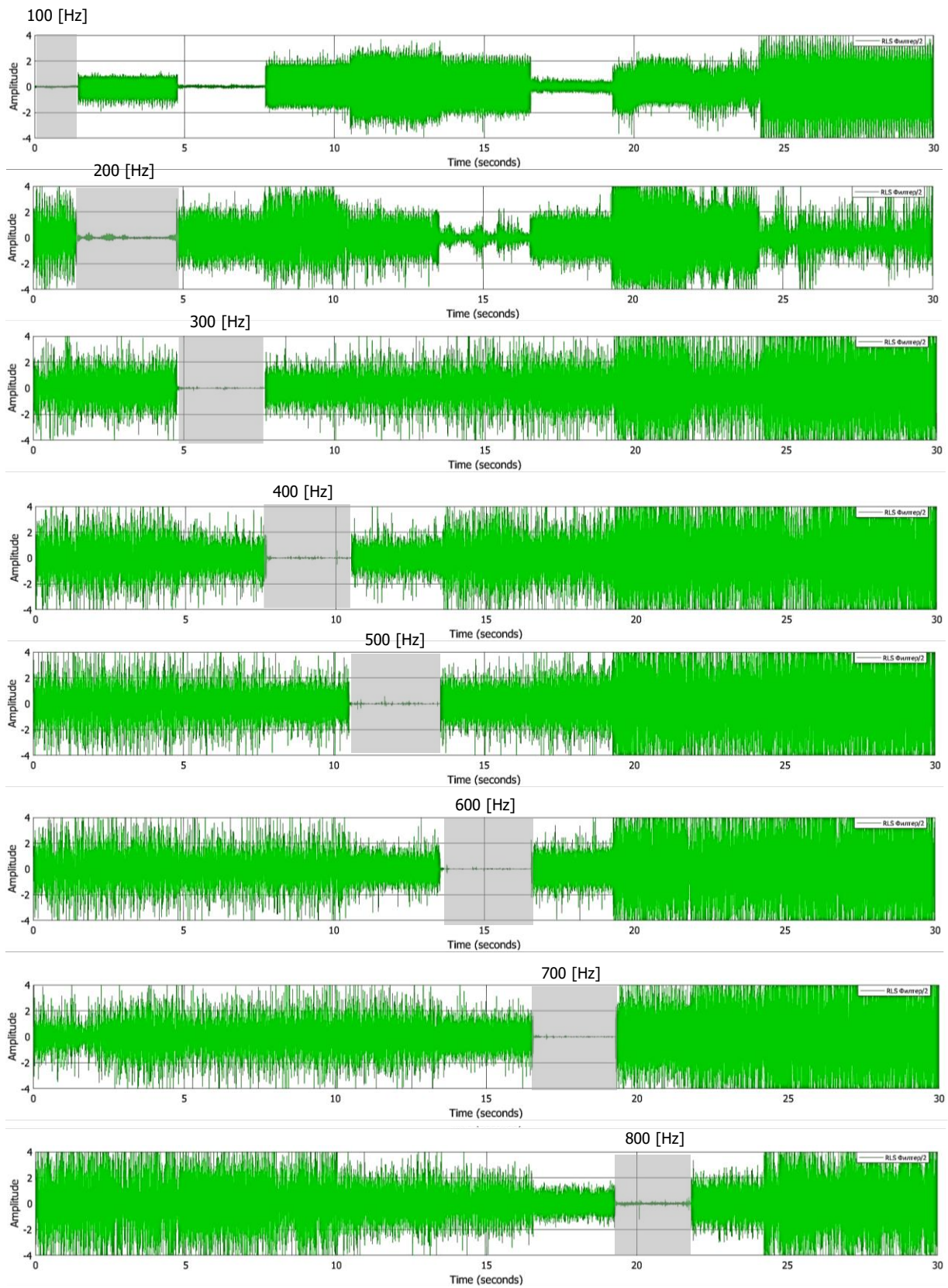
каде $0 < \lambda < 1$ се нарекува „фактор на забораване“, кој дава експоненцијално помала важност на постарите вредности на грешките, дефинирани со разликата помеѓу посакуваниот одговор $d(n)$ и излезот $y(n)$ произведен од трансверзалниот филтер чии тежински коефициенти во време n се еднакви на $x(n), x(n-1), \dots, x(n-M+1)$.

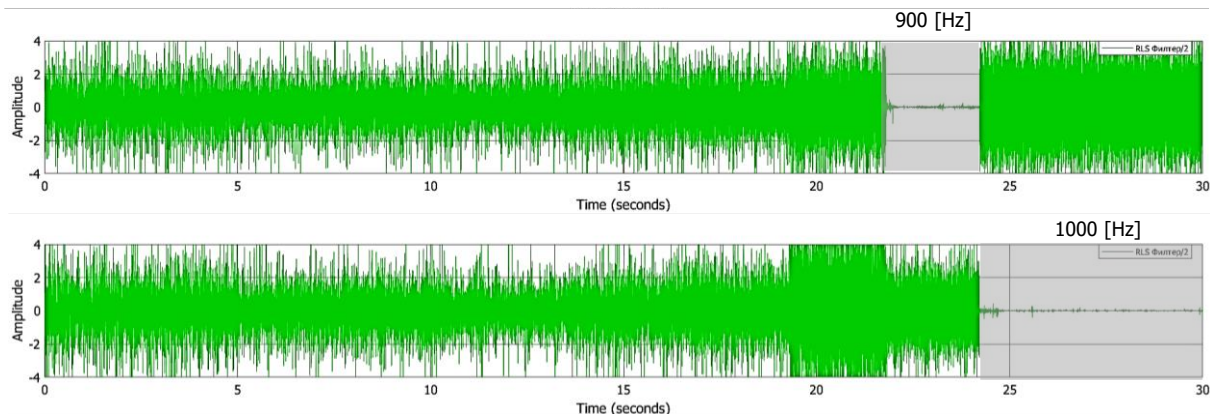
Клучен параметар за проценка на целокупниот перформанс на адаптивниот алгоритам на рекурзивни најмали квадрати (RLS) е „факторот на забораване“ λ . Вредноста на овој параметар води кон постигнување на компромис помеѓу стабилноста и прилагодливоста од една страна, и брзината на конвергенција на системот од друга страна преку проценка на тоа колку брзо филтерот ги „заборава“ претходните информации од претходните итерации. Исто така, како влезен параметар е и должината на филтерот, исто како и кај LMS адаптивниот филтер, кој што ја специфицира должината на векторот на тежинските коефициенти.

RLS адаптивниот филтер се применува на истиот модел како и кај LMS филтерот, со тоа што истото објаснување за Сликата 4-13 се однесува и овде. Единствено се разликува блокот за адаптивно филтрирање, каде тука наместо LMS, е поставен RLS филтерот со влезни параметри за должина на филтерот и „факторот на забораване“ λ , кој што може да има вредности од 0 до 1.

Резултатите прикажани на Сликата 4-13 се за одбрана должина на филтерот 20 и фактор на пропуштање=1. Од сликата може да се забележи дека на секоја од фреквенциите е постигнато значително амплитудно намалување на сигналот во спектарот на соодветната фреквенција, многу подобро отколку кај LMS адаптивниот филтер, но со значително влијание во останатиот дел од сигналот надвор од временскиот интервал на фреквенцијата која се поништува.

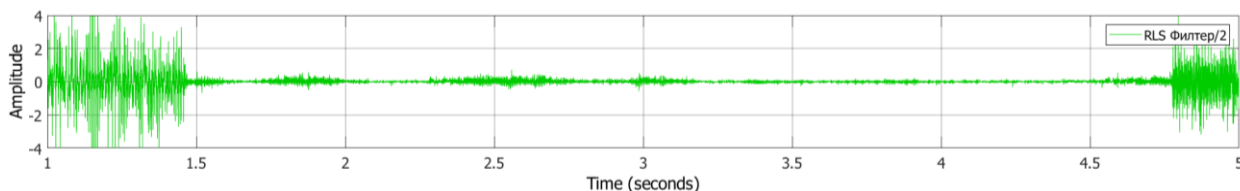




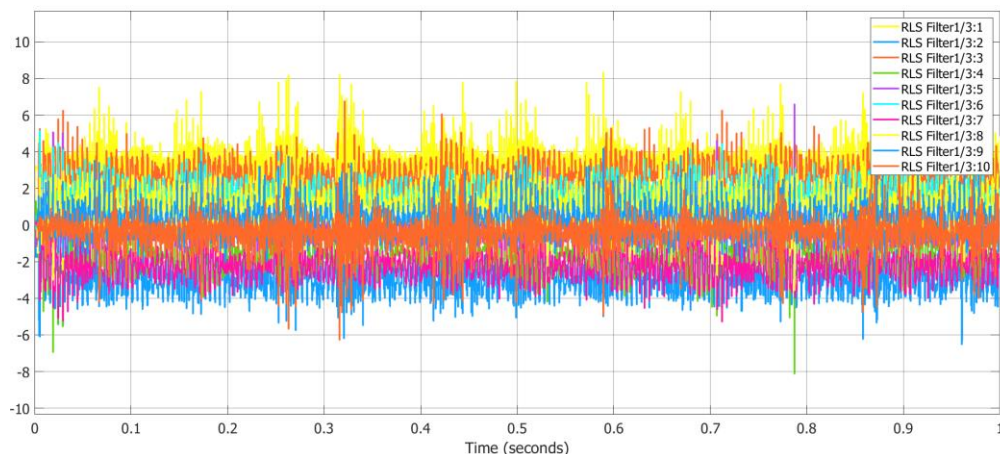


Слика 4-13: Резултати од примена на RLS адаптивниот филтер на 10 фреквенции во временски домен

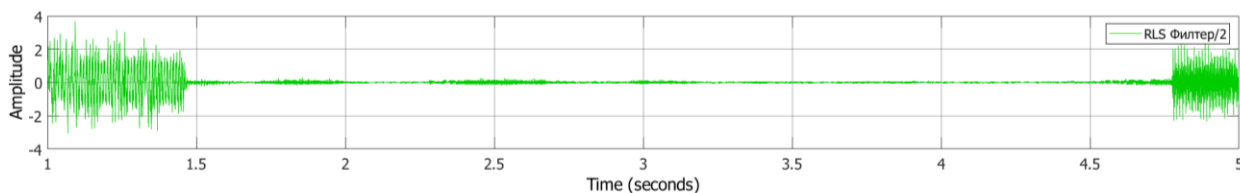
Големината на „факторот на заборавање“ λ влијае на брзината на конвергенцијата на и на стабилноста на адаптивниот филтер. Во овој случај, за увид во влијанието на факторот на перформансот на системот, неговата вредност беше променета од најмала вредност $\lambda=0,2$, во поголема $\lambda=0,7$ и максимална $\lambda=1$. На сликите 4-14, 4-16 и 4-18 се прикажани намалувањата на сигналот со фреквенцијата од 200 [Hz] во амплитудно-временски приказ со големина на факторот $\lambda=0,2$, $\lambda=0,7$, $\lambda=1$ соодветно. Од прикажаните резултати може да се забележи дека во случајот на поголем „фактор на заборавање“, се обезбедува многу слабо намалување на амплитудата на фреквенцијата на сигналот од интерес, во споредба со случаите за $\lambda=0,7$ и $\lambda=0,2$, каде намалувањето е значително. Доколку се споредат сликите 4-14 и 4-16, може да се забележи дека намалувањето на амплитудата на соодветната фреквенција од 200 [Hz] е подоминантно во случајот кога е применет фактор $\lambda=0,7$, и тоа со многу помало влијание на останатиот дел од спектарот, односно останатиот дел од сигналот. За поткрепување на овие заклучоци, на сликите 4-15, 4-17 и 4-19 се дадени графичките прикази на конвергенција на тежинските коефициенти за истата фреквенција од 200 [Hz], за соодветните фактори.



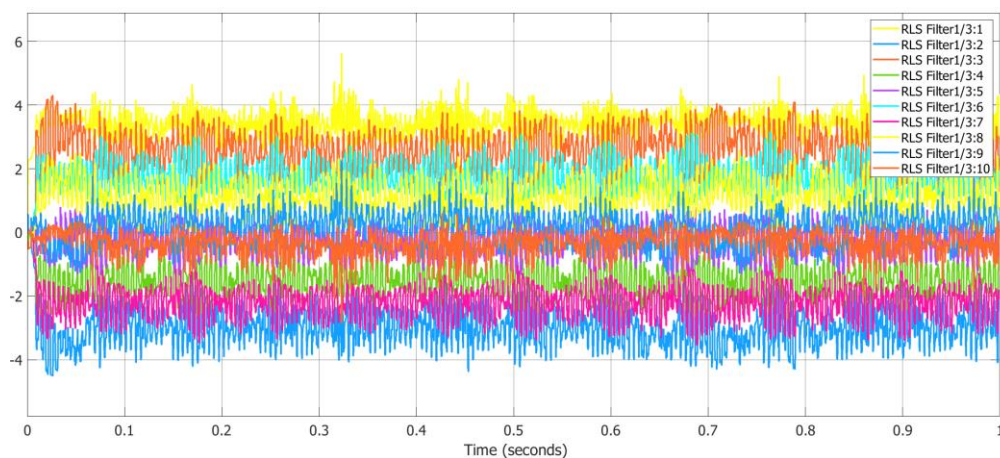
Слика 4-14: Амплитудно-временски приказ на намалување на фреквенцијата од 200 Hz со $\lambda=0,2$



Слика 4-15: Конвергенција на тежинските коефициенти на фреквенција од 200 Hz со $\lambda=0,2$



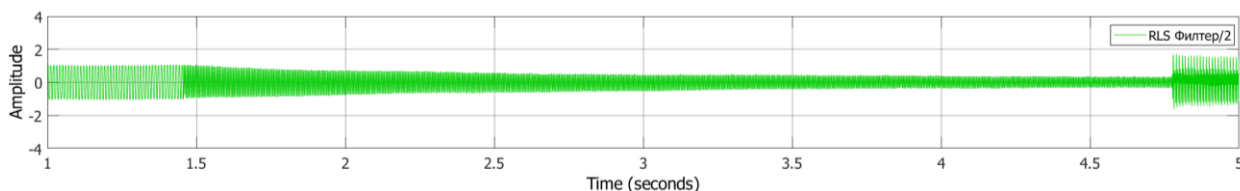
Слика 4-16: Амплитудно-временски приказ на намалување на фреквенцијата од 200 Hz со $\lambda=0,7$



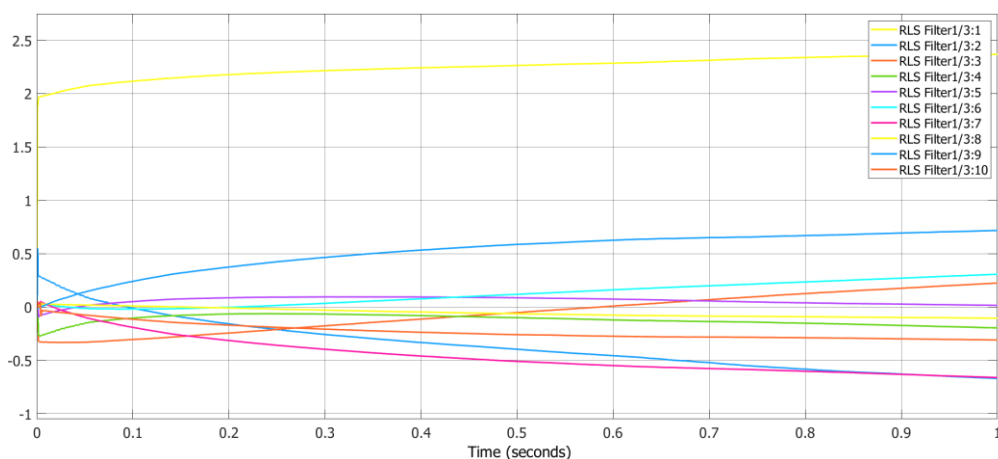
Слика 4-17: Конвергенција на тежинските коефициенти на фреквенција од 200 Hz со $\lambda=0,7$

Од овие резултати може да се забележи дека за вредности на факторот од 0,2 и 0,7, адаптацијата на филтерот е многу побрза, но и филтрирањето е многу подобро, за разлика од резултатите при примена на максимален фактор на забораване 1, каде се забележува бавна адаптација, и нестабилна конвергенција на тежинските коефициенти

на филтерот, но и слабо филтрирање и слаби резултати во намалувањето на сигналот на соодветната фреквенција.



Слика 4-18: Амплитудно-временски приказ на намалување на фреквенцијата од 200 Hz со $\lambda=1$

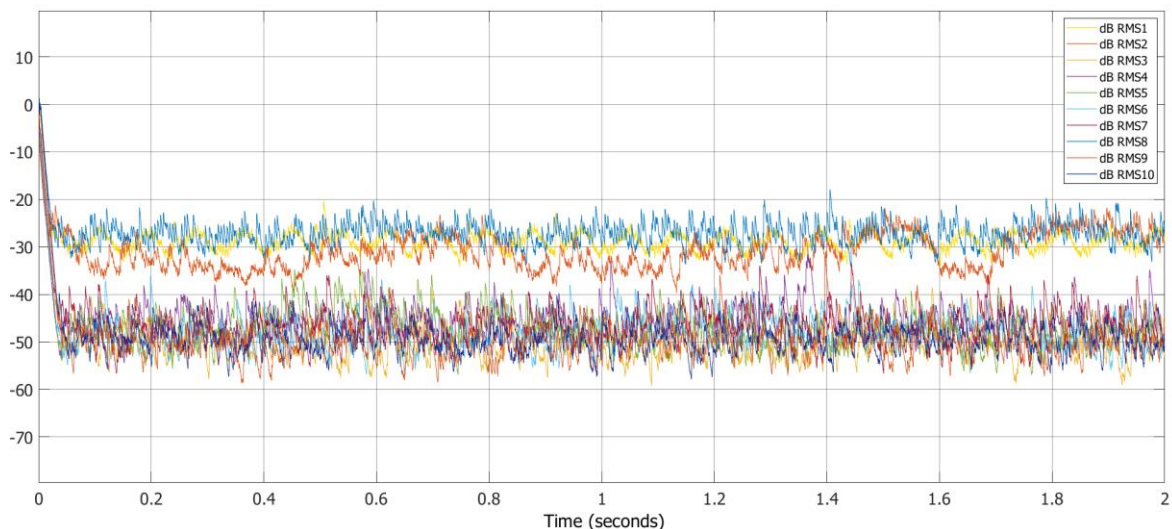


Слика 4-19: Конвергенција на тежинските коефициенти на фреквенција од 200 Hz со $\lambda=1$

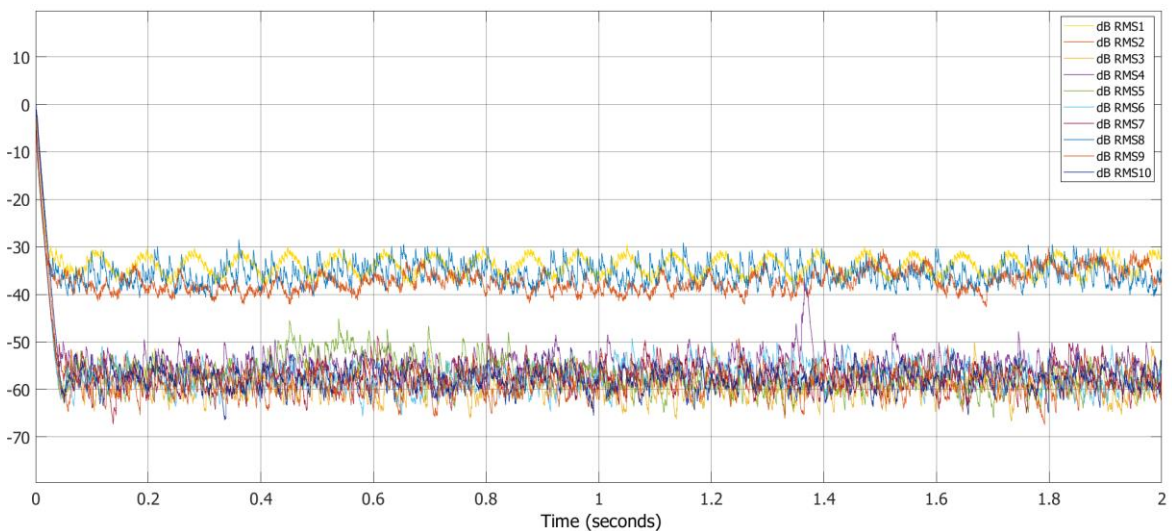
На Сликата 4-20 се прикажани кривите на средна квадратна грешка при примена на RMS адаптивниот филтер за сигналот на сите 10 фреквенции со фактор на забораване $\lambda=0,2$. Од сликата може да се забележи дека конвергенцијата на најмалата средна квадратна грешка се достигнува брзо и еднаква за сите фреквенции на сигналот која се достигнува за 0,003 секунди. Забележително е дека за 100, 200 и 800 [Hz] минималната средна квадратна грешка варира од -20 до -30 [dB], за разлика од нејзината вредност на останатите фреквенции каде варира од -30 до -60 [dB]. Прилагодливоста по достигнување на стабилната состојба е слична на сите фреквенции, но најдобра е на фреквенција од 100 [Hz].

На Сликата 4-21 се прикажани кривите на средна квадратна грешка при примена на RMS адаптивниот филтер за сигналот на сите 10 фреквенции со фактор $\lambda=0,7$. Од сликата може да се забележи дека конвергенцијата на најмалата средна квадратна грешка се достигнува брзо и еднаква за сите фреквенции на сигналот која се достигнува за 0,003 секунди. Она што е очигледно е дека за 100, 200 и 800 [Hz] минималната средна квадратна грешка варира од -30 до -40 [dB], за разлика од нејзината вредност на останатите фреквенции каде варира од -50 до -65 [dB]. Прилагодливоста по

достигнување на стабилната состојба е слична на сите фреквенции, но не се постигнува со голема брзина.

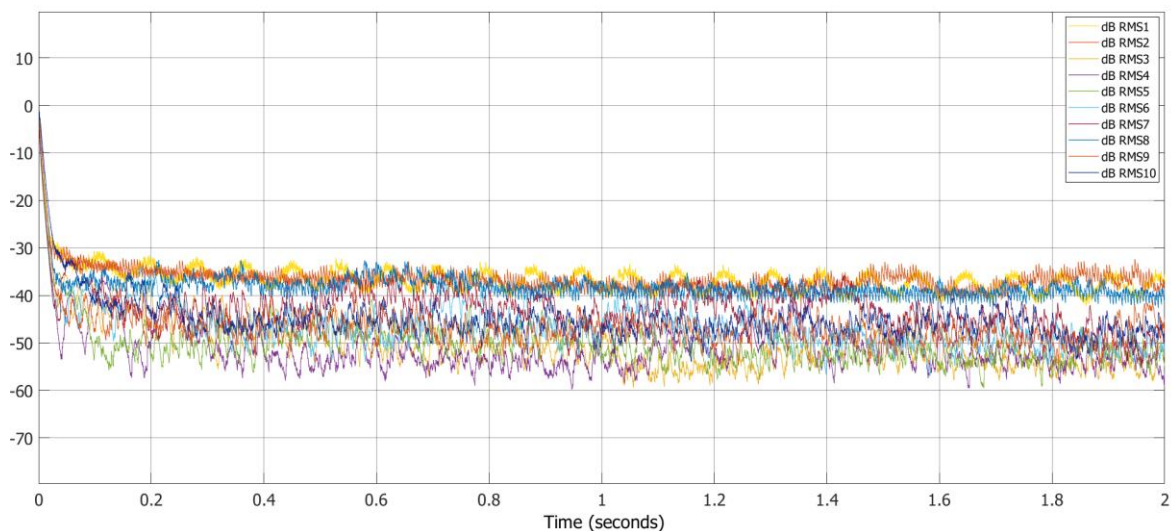


Слика 4-20: Минимална средна квадратна грешка при примена на RMS филтерот на сите 10 фреквенции со „фактор на забораване“ $\lambda=0,2$



Слика 4-21: Минимална средна квадратна грешка при примена на RMS филтерот на сите 10 фреквенции со „фактор на забораване“ $\lambda=0,7$

На Сликата 4-22 се прикажани кривите на минималната средна квадратна грешка при примена на RMS адаптивниот филтер за сигналот на сите 10 фреквенции со „фактор на забораване“ $\lambda=1$. Од сликата може да се забележи дека сигналите со фреквенција од 100, 200 и 1000 [Hz] повторно покажуваат наголема средна квадратна грешка, но по достигнување на стабилната состојба, имаат најдобра прилагодливост. Сите фреквенции достигнуваат брза конвергенција за 0,002 секунди.



Слика 4-22: Минимална средна квадратна грешка при примена на RMS филтерот на сите 10 фреквенции со „фактор на забораване“ $\lambda=1$

Од прикажаните резултати може да се заклучи дека „факторот на забораване“ λ во голема мера влијае на вредноста на минималната средна квадратна грешка, додека не многу на брзината на конвергенција и прилагодливоста на RMS адаптивниот филтер. Имено, од графициите може да се заклучи дека средната квадратна грешка конвергира приближно исто за двете големини на факторот, но прилагодливоста по достигнување на конвергенцијата е различна за различни фреквенции и различен „фактор на забораване“. Од друга страна, очигледно е дека „факторот на забораване“ влијае на големината на средната квадратна грешка, која достигнува минимална вредност за $\lambda=0,7$ до речиси -70 [dB].

4.4 АНАЛИЗА НА ПРИМЕНАТА НА NLMS АДАПТИВНИОТ ФИЛТЕР

Кај алгоритмот на најмали средни квадрати, големината на векторот на тежинските коефициенти се прилагодува согласно релацијата $2\mu e(n)\vec{x}(n)$, која е директно пропорционална на големината на влезот $\vec{x}(n)$. Кога вредноста на $\vec{x}(n)$ е голема, кај алгоритмот на најмали средни квадрати се случува градиент на зголемување на сигналот. Со цел решавање на овој проблем, како надоградување развиен е нормализираниот алгоритам на најмали средни квадрати (NLMS). Зголемувањето на влезот $\vec{x}(n)$ го прави изборот на μ многу тежок, речиси невозможен за да се гарантира стабилноста на алгоритмот. Поради тоа, нормализираниот алгоритам на најмали средни квадрати има променлив параметар на големината на чекорот, дадена со релацијата:

$$\mu = \frac{\bar{\mu}}{\delta + \|\vec{x}(n)\|^2} \quad (4.2)$$

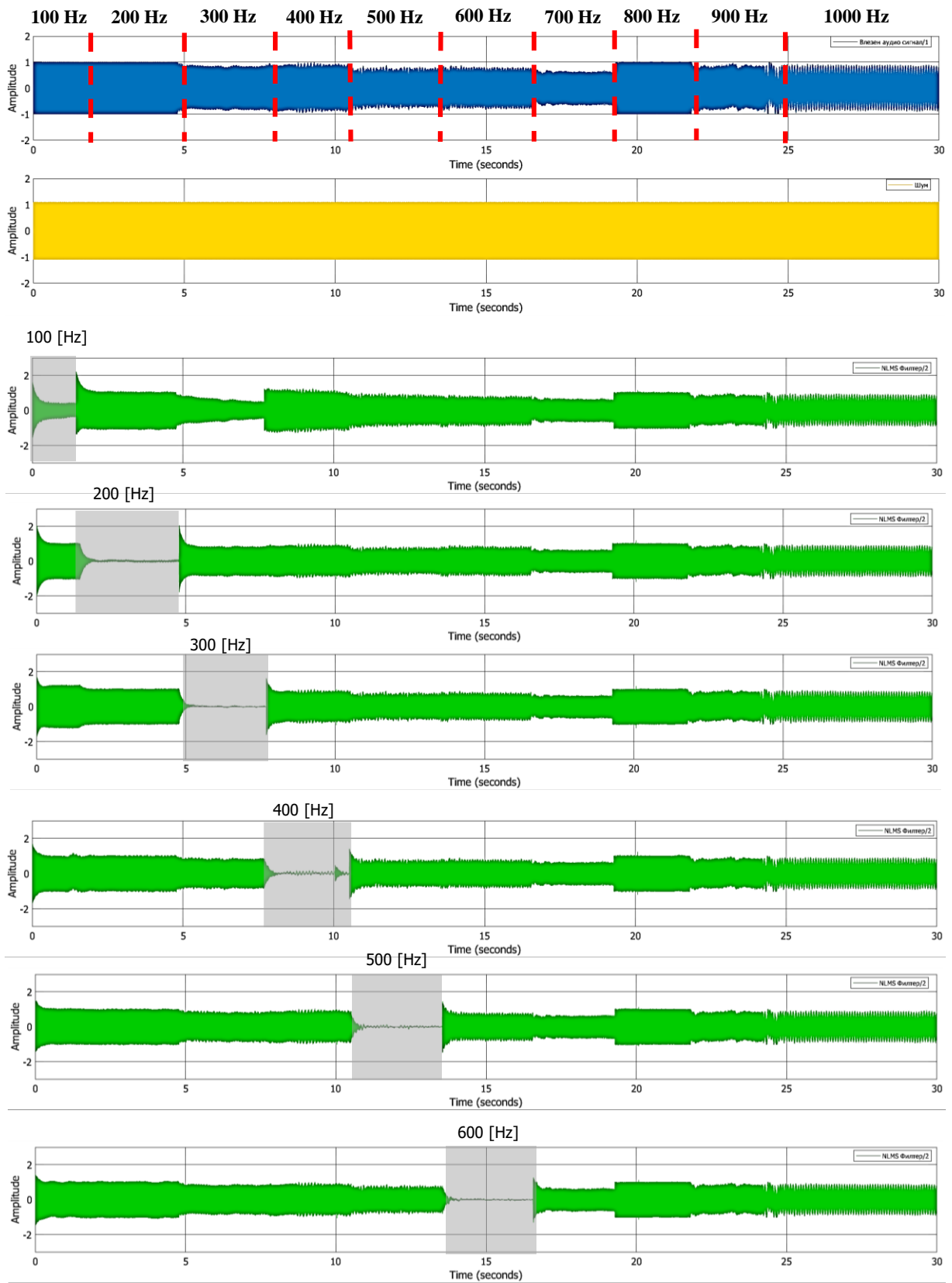
каде δ е мала константа, $\bar{\mu}$ е параметарот на големината на чекорот на NLMS $0 < \bar{\mu} < 2$, а $\|\cdot\|$ е Евклидова норма. Векторот на тежинските коефициенти $\vec{w}(n)$ е претставен со:

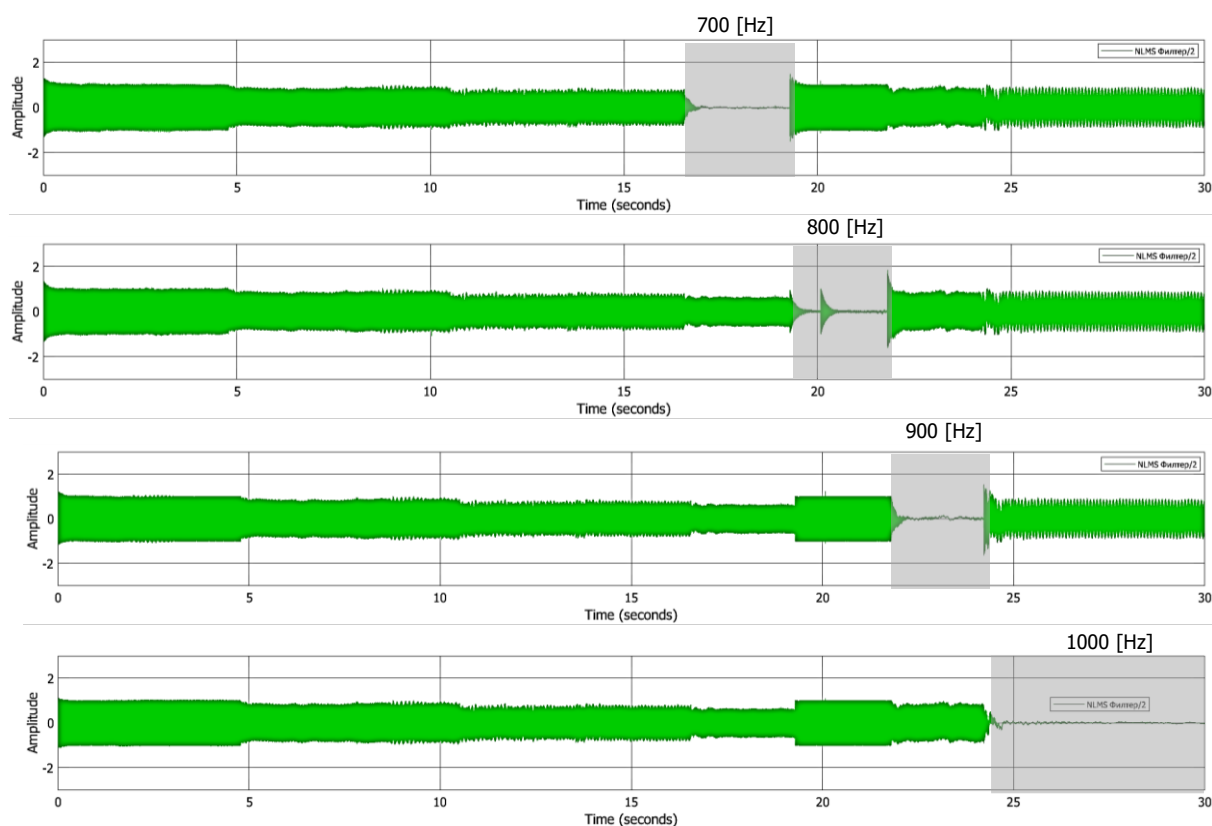
$$\vec{w}(n+1) = \vec{w}(n) + 2\mu e(n)\vec{x}(n) = \vec{w}(n) + 2\frac{\bar{\mu}}{\delta + \|\vec{x}(n)\|^2} e(n)\vec{x}(n) \quad (4.3)$$

Табела 4.3: Карактеристики на NLMS адаптивниот филтер

Влез:	Вектор на тежински коефициенти $\vec{w}(n)$, вектор на влезен сигнал $\vec{x}(n)$, и посакуван излез $d(n)$
Излез:	Излез од филтерот $y(n)$, следна итерација на промена на векторот на тежински коефициенти $\vec{w}(n+1)$
Параметри:	N=број на итерации δ =мала константа $\bar{\mu}$ =параметар на чекорот на алгоритмот $0 < \bar{\mu} < 2$
Иницијализација:	Имајќи го во предвид претходниот тежински коефициент, за пресметување се користи $\vec{w}(0)$, во спротивно $\vec{w}(0) = 0$
Чекор 1:	Филтрирање $y(n) = \vec{w}^T(n)\vec{x}(n)$
Чекор 2:	Проценка на грешката: $e(n) = d(n) - y(n)$
Чекор 3:	Адаптација на векторот на тежинските коефициенти: $\vec{w}(n+1) = \vec{w}(n) + 2\frac{\bar{\mu}}{\delta + \ \vec{x}(n)\ ^2} e(n)\vec{x}(n)$

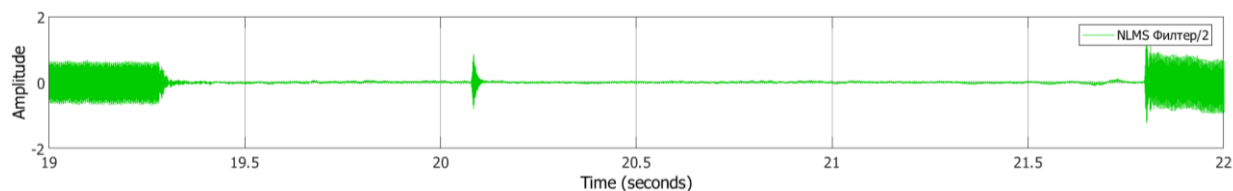
NLMS адаптивниот филтер е екстензија на стандардниот LMS филтер и неговата практична имплементација е многу слична, а неговите карактеристики се дадени во Табела 4.3. Примената на адаптивниот филтер NLMS, исто како и кај LMS филтерот зависи од вредностите зададени за должината на филтерот, големината на чекорот μ и „факторот на пропуштање“. На Слика 4-23 се прикажани амплитудно-временските одговори на системот при различни фреквенции на сигналот, за истиот референтен сигнал, односно аудио датотека на кој се снимени сите 10 фреквенции со користење на NLMS адаптивниот филтер. Резултатите прикажани на Сликата 4-23 се за одбрана должина на филтерот 20, големина на чекорот $\mu=0,005$ и „фактор на пропуштање“=1, исто како и за добивање на резултатите кај LMS адаптивниот филтер. Може да се забележи дека на секоја од фреквенциите е постигнато значително амплитудно намалување на сигналот во спектарот на соодветните фреквенции, со генерално подобар перформанс од моделот каде што е применет LMS филтерот.



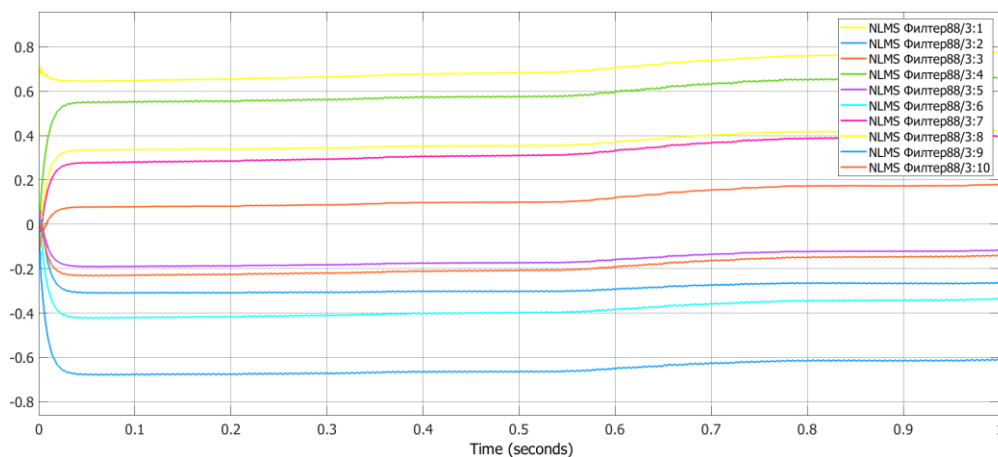


Слика 4-23: Резултати од примена на NLMS адаптивниот филтер на 10 фреквенции во временски домен

Големината на чекорот μ влијае на брзината на конвергенцијата на средните вредности на тежинските коефициенти на NLMS адаптивниот филтер и на стабилноста на NLMS адаптивниот филтер, исто како и кај LMS филтерот. Во овој случај, вредноста на големината на чекорот μ е променета од повисока вредност $\mu=0,09$ во помала $\mu=0,005$. На Слика 4-24 како репрезентативно е прикажано намалувањето на фреквенцијата од 800 Hz во амплитудно-временски приказ со големина на чекорот $\mu=0,09$, додека на Слика 4-26 е прикажано намалувањето на фреквенцијата од 800 [Hz] во амплитудно-временски приказ со големина на чекорот $\mu=0,005$. Од прикажаните резултати може да се забележи дека во случајот на поголем чекор $\mu=0,09$, се обезбедува брза адаптација, со подобри резултати во намалувањето на фреквенцијата. Од друга страна, за чекор $\mu=0,005$, адаптацијата е побавна и резултатите за перформансот во намалување на амплитудата се послаби.

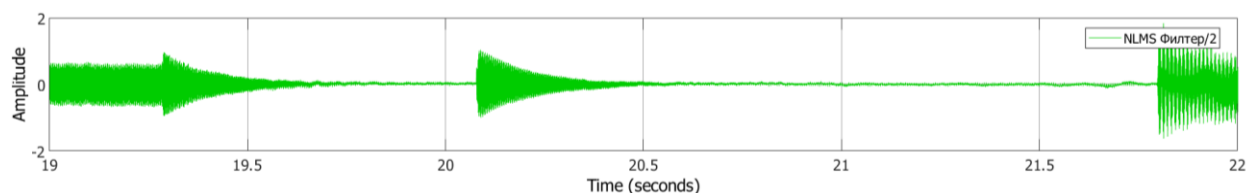


Слика 4-24: Амплитудно-временски приказ на намалување на фреквенцијата од 800 Hz со $\mu=0,09$



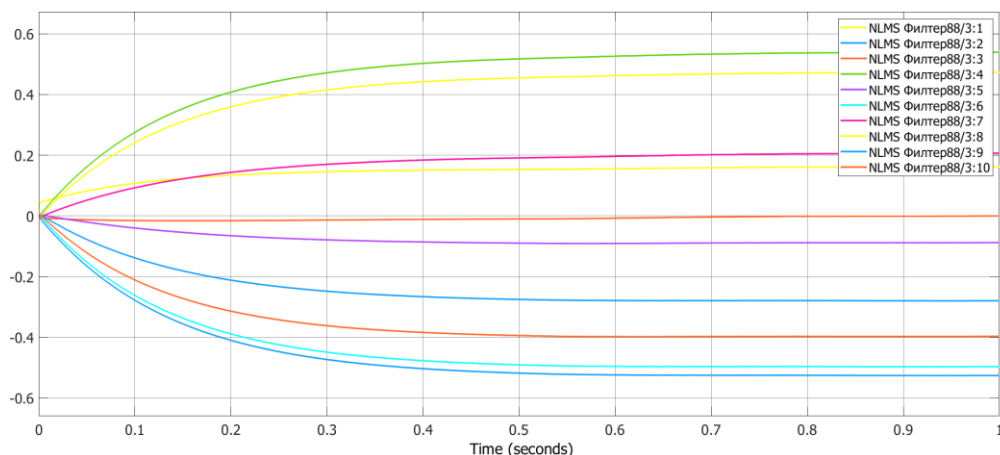
Слика 4-25: Конвергенција на тежинските коефициенти на фреквенција од 800 Hz со $\mu=0,09$

За поткрепување на овие заклучоци, на сликите 4-25 и 4-27 се дадени графичките прикази на конвергенција на тежинските коефициенти за истата фреквенција од 800 [Hz], за соодветните чекори $\mu=0,09$ и $\mu=0,005$. Од овие резултати може да се забележи дека за поголемиот чекор $\mu=0,09$, се обезбедува брза адаптацијата на филтерот, за разлика од резултатите при примена на помал чекор $\mu=0,005$, каде се забележува побавна адаптација.



Слика 4-26: Амплитудно-временски приказ на намалување на фреквенцијата од 800 Hz со $\mu=0,005$

Слично како и кај примената на адаптивниот филтер LMS, поголема должина на филтерот бара поголеми пресметковни ресурси и системот работи побавно со помала грешка по постигнување на конвергенција во тежинските коефициенти, но сепак со многу голема должина на филтер таа грешка не може да се минимизира. За потребите на оваа апликација, должината на филтерот беше избрана да биде повторно 20.

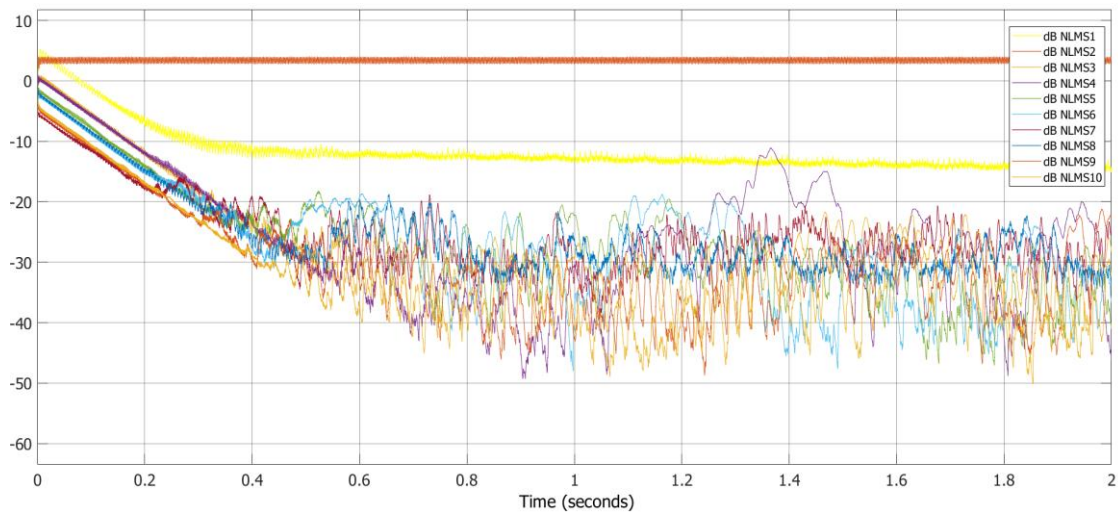


Слика 4-27: Конвергенција на тежинските коефициенти на фреквенција од 800 Hz со $\mu=0,09$

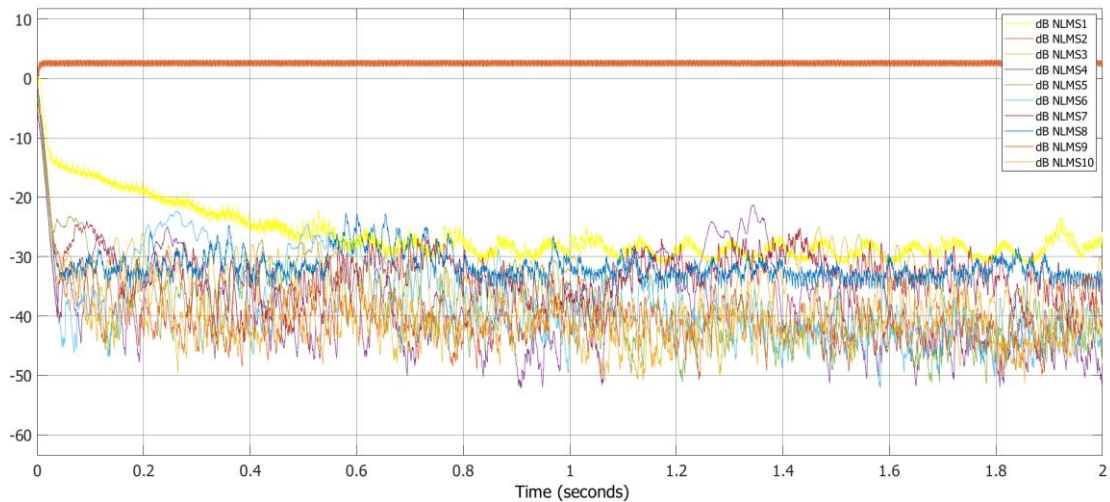
На Сликата 4-28 се прикажани кривите на средна квадратна грешка при примена на NLMS адаптивниот филтер за сигналот на сите 10 фреквенции со чекор $\mu=0,005$. Од сликата може да се забележи дека конвергенцијата на најмалата средна квадратна грешка е најбрза за сигналот со фреквенција 200 [Hz], но е и највисока - 3 [dB]. За сигналот од 100 [Hz] конвергенцијата е најбавна, но има добра прилагодливост и по достигнување на минималната средна квадратна грешка, односно стационарната состојба на -12 [dB] после 0,3 секунди со мали промени во коефициентите потоа. Конвергенцијата на останатите фреквенции е бавна, и се достигнува после 0,4 секунди, со големи нерамномерности во прилагодливоста дури и по достигнувањето на стабилноста. Солиден перформанс покажува конвергенцијата на 700 и на 800 [Hz], каде и покрај долгото време потребно за достигнување на стабилната состојба, прилагодливоста не покажува големи осцилации од стабилната состојба (сина и темно црвена линија). Минималната конвергенција која се достигнува е до -50 [dB].

На Сликата 4-29 се прикажани кривите на минималната средна квадратна грешка при примена на NLMS адаптивниот филтер за сигналот на сите 10 фреквенции со чекор $\mu=0,09$. Од сликата може да се забележи дека за разлика од конвергенцијата на фреквенциите со чекор $\mu=0,005$, тука стабилната состојба на сите фреквенции се достигнува многу побрзо, за 0,003 секунди.

Сличности се забележуваат во однесувањето на кривите на конвергенција кај фреквенциите од 100 и од 200 [Hz], иако конвергенцијата на кривата за сигнал од 200 [Hz] покажува побрза конвергенција, сепак со големи промени во прилагодливоста. Повторно, солиден резултат е забележан кај фреквенцијата од 800 [Hz] (темно сина линија), каде и покрај брзата конвергенција, не се забележуваат големи промени во текот на прилагодливоста.



Слика 4-28: Минимална средна квадратна грешка при примена на NLMS филтерот на сите 10 фреквенции со големина на чекор $\mu=0,005$

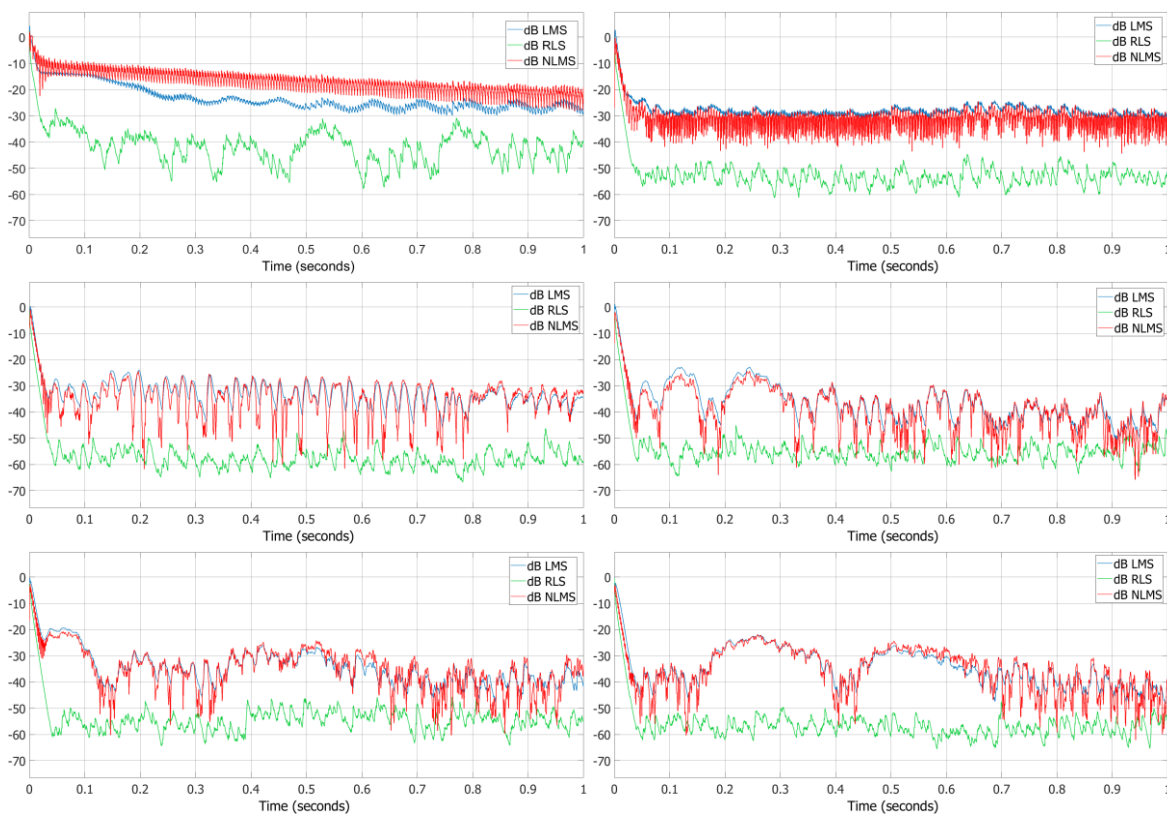


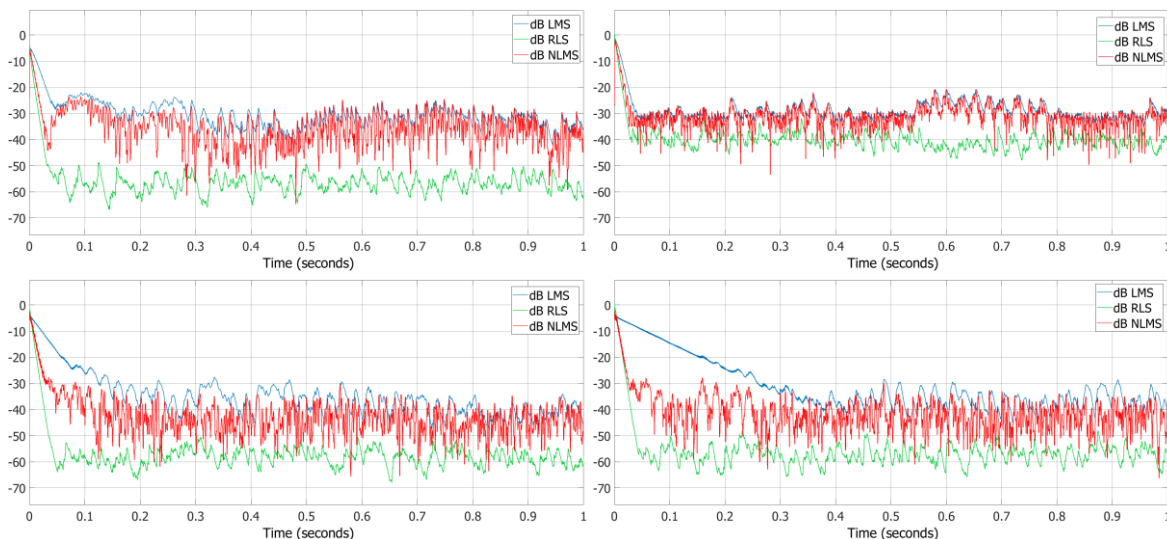
Слика 4-29: Минимална средна квадратна грешка при примена на NLMS филтерот на сите 10 фреквенции со големина на чекор $\mu=0,09$

Од сликите 4-28 и 4-29 е повторно евидентно дека конвергенцијата и на NLMS адаптивниот филтер директно зависи од големината на чекорот. Имено, од граfiците може да се заклучи дека средната квадратна грешка конвергира побрзо за поголема вредност на чекорот 0,09, отколку за помала 0,005 за сите различни фреквенции на сигналот. Од друга страна, во овој случај прилагодливоста на алгоритмот по достигнувањето на стабилната состојба е минимално намалена со поголема вредност на чекорот, но сепак забележителна.

4.5 КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА НА РЕЗУЛТАТИТЕ

На Слика 4-30 се прикажани резултатите за средната квадратна грешка на трите анализирани адаптивни филтри, LMS, RLS и NLMS за сите 10 фреквенции кои беа разгледувани во претходните анализи. Резултатите кои ги покажува LMS филтерот укажуваат на тоа дека тој има бавна конвергенција, иако квалитетот на излезниот сигнал при негова примена е супериорен поради задржување на стабилноста на другите фреквенции од сигналот и солидното намалување на фреквенциите од интерес. RLS алгоритмот има значително побрза конвергенција во споредба со LMS филтерот, и неговата конвергенција не зависи од карактеристиките на влезниот сигнал, што не е случај со LMS адаптивниот филтер. RLS филтерот (обележан со зелена крива на графициите) покажува најбрза конвергенција во споредба со LMS и NLMS филтрите за сите 10 случаи. Очигледно е дека RLS филтерот покажува и солидна прилагодливост по достигнувањето на стабилната состојба која не зависи од природата на влезниот сигнал, а тој достигнува и најмала средна квадратна грешка во споредба со останатите два адаптивни филтри.





Слика 4-30: Минимална средна квадратна грешка при примена на LMS, RLS и NLMS филтерот на сите 10 фреквенции

Од друга страна, NLMS филтерот покажува најслаби резултати во однос на останатите два, што подразбира најбавна конвергенција, но и најмала прилагодливост по достигнување на стабилната состојба. Со оглед на тоа што зависи од должината на филтерот (во овој случај 20 исто како и кај LMS алгоритмот) и големината на чекорот ($\mu=0,09$ исто како и кај LMS алгоритмот), кривите на NLMS алгоритмот се слични на кривите на LMS алгоритмот, но некаде и со послаб ефект, како во случајот на 100, 900 и 1000 [Hz].

4.6 ЗАКЛУЧОЦИ

Во ова Поглавје е презентираан аналитички модел за активна контрола на аудио сигнал со примена на три различни адаптивни филтри. Во моделот се анализирани перформансите на системот врз основа на анализа на карактеристиките на секој од адаптивните алгоритми, третирајќи чисти синусоидни тонови ефектот на нивно намалување. Целта е да се објасни ефективноста на користење на адаптивните филтри за намалување на амплитудата на звукот на определени фреквенции. Со користење на хардверски модул за аквизиција на податоци од National Instruments за снимање на аудио сигналите кои се тестирани, поврзан со MATLAB/Simulink околината, се донесени заклучоци за предностите и недостатоците на секој од применетите адаптивни алгоритми при примена во систем за активно поништување на звучен сигнал. MATLAB/Simulink се покажа како важна алатка за дизајнирање и имплементација на адаптивните филтри, а методот на аквизиција на податоците и обработката на сигналите прикажан во ова Поглавје покажаа позитивни аспекти и можности за процесирање и тестирање на комплексни аудио сигнални карактеристики со потенцијал за примена на системот во реално-временски услови. Објаснети се индивидуалните карактеристики и параметри

кои мора да бидат запазени на секој од адаптивните филтри за правилна адаптација и оптимални резултати.

По спроведените анализи, може да се заклучи дека RLS адаптивниот алгоритам има поголема робусност од LMS и NLMS адаптивните алгоритми, поради помалата средна квадратна грешка и побрзата конвергенција. Во споредба со останатите два алгоритми, RLS алгоритмот покажува посилен стабилност со солидни резултати при намалување на амплитудата на сигналот на соодветните фреквенции, но зголемување на останатите фреквенции. Од друга страна, LMS и NLMS адаптивните филтри покажуваат сличен и солиден перформанс на намалување на амплитудата на сигналот поради нивната сродност, иако NLMS филтерот заостанува во брзината на конвергенција на тежинските коефициенти и во фазата на прилагодливост по достигнување на стабилната состојба. Генерално, евалуирајќи ги сите три алгоритми според параметрите споменати погоре, може да се заклучи дека RLS алгоритмот покажува предност во намалување на звучното ниво во споредба со останатите два, LMS и NLMS алгоритмите. Но, RLS филтерот има поголема комплексност и бара поголеми пресметковни ресурси, поради што може да покаже слабости при имплементација во хардверски систем во реално-временски услови. Исто така, тој покажува и значително влијание на останатите фреквенции од сигналот кои не се предмет на поништување, што може да доведе до нарушување на комплетната применливост на системот.

5

РЕАЛИЗАЦИЈА НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН СИСТЕМ ЗА АКТИВНА КОНТРОЛА НА АКУСТИЧНА СРЕДИНА

Суштинското познавање на физиката и карактеристиките на однесувањето на звучните бранови во едnodимензионален простор е од големо значење за предвидување на неговата дисперзија, а со цел да се дизајнира активен систем за контрола на акустична средина со задоволителни перформанси. Физичката имплементација на активниот систем за контрола на звук претставува експериментален систем каде се генерира контролен (управувачки) сигнал со цел да се обезбеди деструктивна интерференција на брановите на локацијата од интерес. Имплементацијата на системите за активна контрола на звук се категоризира во системи со отворена повратна врска и системи со директна повратна врска. Генерално, системите со отворена повратна врска се користат за синтетизирање на контролниот звук каде е потребно да се изврши активна контрола на периодични звуци со познати фреквентни карактеристики. Тие користат еден контролен сензор за звук за определување на разликата во примарниот и контролниот звук, кој служи како повратна информација во системот на адаптивните филтри. За разлика од системите со отворена повратна врска, системите со директна повратна врска се применуваат за широкопојасен (стохастичен) звук и користат два сензори за звук, еден за определување на карактеристиките на примарниот непознат сигнал, а другиот за определување на разликата во звуците од примарниот и контролниот звучник [179].

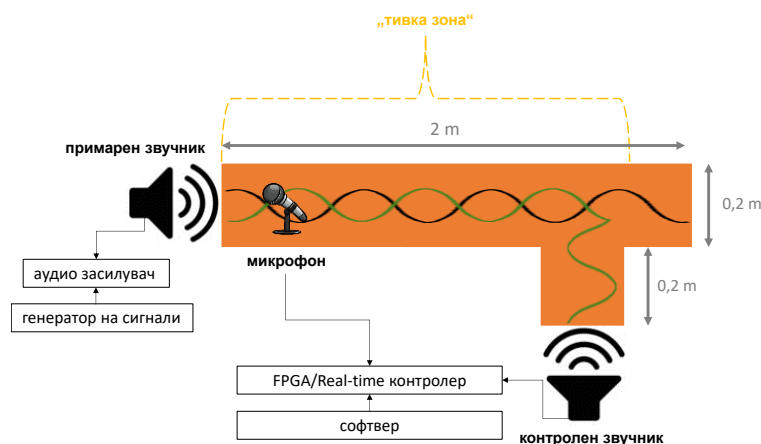
За постигнување на прецизен и стабилен активен систем за контрола на звукот, од големо значење е добриот избор на технички спецификации на неговите компоненти (извор на звук, сензор за звук, како и единица за аквизиција и обработка на сигналот). Изворите на звук треба да обезбедат соодветен динамички опсег за да можат да ги генерираат фреквенциите од интерес за активна контрола на звукот, сензорите за звук треба да обезбедуваат добра чувствителност на влезната мерна големина, а единиците

на процесорот на сигналот треба да бидат способни да достигнат голема брзината на одговор, како и брза конвергенција. Исто така, изборот на контролниот дизајн треба да биде таков што треба да има способност за додавање на поголем број на канали за интегрирање на модули за аквизиција на аналогни сигнали, како и модули за генерирање на аналогни сигнали [180]. Покрај техничките барања, друг важен аспект е изборот и правилното моделирање на адаптивниот дигитален филтер и адаптивниот алгоритам кој директно влијае на карактеристиките на системот.

Развојот на примената на системите за активна контрола на звукот е поделен на примена за намалување на непосакуван звук во слободен простор, намалување звук во кабински простори, локализирано намалување на бучава (слушалки) и намалување на звук во едно-димензионална средина (канал). Во ова Поглавје фокусот е поставен на дизајн и имплементација на систем за активна контрола на едно-димензионална акустична средина, со што ќе биде искористена канална геометрија. Вообичаено, издувните канали се составен дел од системите за ладење или вентилација. Конвенционалниот систем за пасивна контрола на бучавата што се користи за ублажување на непосакуваниот звук кој се јавува во каналите е корисен само за намалување на високите фреквенции. Но, бучавата која се јавува во системите од канали за ладење или вентилација има фреквентен состав со изразени ниски фреквенции, па пасивните методи се често недоволно ефикасни. Во таа насока, истражувањата во литературата укажуваат на фаворизирање на пристапот на активната контрола на звукот во акустична средина во канал, кој нуди квалитетно апликативно решение за намалување на ниско-фреквентните звуци [181-183].

5.1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПОСТУЛАЦИЈА НА СИСТЕМОТ ЗА АКТИВНА КОНТРОЛА НА АКУСТИЧНА СРЕДИНА

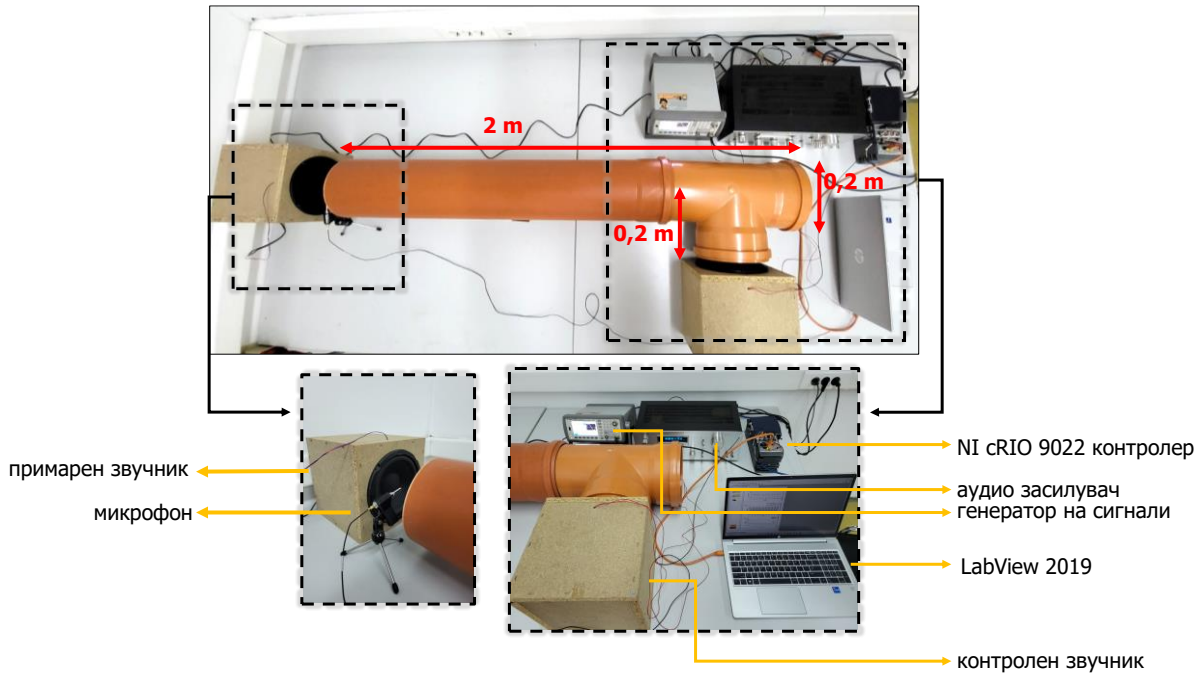
Во рамки на реализацијата на предложениот систем за активна контрола на акустичната средина во канал, применет е пристапот на контрола со отворена повратна врска, чиј шематски приказ е даден на Слика 5-1. Контролните системи со отворена повратна врска подразбираат користење на еден сензор за звук за мерење на разликата помеѓу карактеристиките на примарниот звук и контролниот (управувачки) звук. Системот за активна контрола се состои од акустичен канал, примарен звучник за генерирање на чист синусоиден сигнал, како и контролен (управувачки) звучник за генерирање на сигнал со исти фреквентни и амплитудни карактеристики, но со спротивна фаза. Со цел определување на карактеристиките на контролниот звук, потребно е примарниот звучен сигнал да биде снимен со референтниот сензор за звук кој се испраќа до контролерот за обработка на сигналот во реално време. Потоа, овие информации се обработуваат во софтверскиот модел, каде со контролниот дизајн и моделирањето на адаптивните алгоритми се определуваат карактеристиките на контролниот звук.



Слика 5-1: Шематски приказ на системот за активна контрола на акустична средина

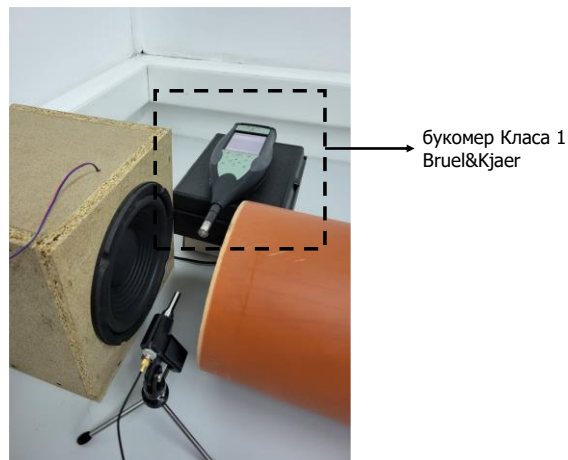
За реализација на вака дефинираниот систем за активна контрола, беа искористени канал изработен од PVC материјал, со кружен напречен пресек со дијаметар 0,2 [m] и должина 2 [m], на кој на растојание 0,2 [m] од едниот крај му е додадена странична гранка за поставување на контролниот (уравувачки) извор на звук. За генерирање на звучните сигнали се искористени два Visaton W 200-8 HiFi звучници. Контролниот микрофон е PCB Piezotronics 130F20, кој спаѓа во класата TEDS сензори со интегрирана EEPROM меморија, која ги чува карактеристиките на самиот сензор како типот на сензорот, сервискиот број, име на моделот и датум на калибрација. За генерирање на примарните звучни сигнали, кои во овој случај се чисти периодични функции, искористен е генератор на сигнали (функционален генератор) Agilent 335521A и аудио засилувач Pioneer SA-508 (Слика 5-2).

Имплементацијата на хардверската контролна единица кај системите за активна контрола на звукот може да се реализира со користење на дигитални сигнални процесори или FPGA (Field-programmable gate array) модул [184]. Дигиталните сигнални процесори имаат предности поради користење на C програмскиот јазик, кое ги прави поедноставни за програмирање и дизајн, но FPGA модулот нуди посериозни предности во насока на постигнување на ниска потрошувачка на моќност и можност за паралелно програмирање. Во овој случај, за аквизиција на аудио сигналите од микрофонот е искористена аквизициона картичка NI 9234 од National Instruments за аквизиција на аналогни сигнали, додека за генерирање на контролниот сигнал од контролниот звучник е искористена картичка за генерирање на аналогни сигнали NI 9263 од National Instruments. Обете картички се додадени на cRIO 9022 контролниот модул од National Instruments кој како систем има интегрирани Real-Time (реално-временска) процесорска единица и FPGA чип, со што се овозможуваат големи брзини, и високо ниво на паралелизам.



Слика 5-2: Експериментална поставување на системот за активна контрола

По инсталирање на експерименталната поставување, чија контрола и визуелизација се одвива во софтверскиот пакет LabView, со цел валидирање на резултатите за намалувањето на звукот во акустичната зона од интерес, беше искористен и мерач на звук од Класа 1 од Bruel&Kjaer. Со овој инструмент се изврши отчитување на резултатите за параметарот L_{AF} за нивото на звук во [dB] пред и по примена на контролата. Поставеноста на инструментот е прикажана на Слика 5-3, и е избрана така да се наоѓа на иста положба како и сензорот за звук за да обезбеди мерење на интензитетот на звукот согласно физиката на планарна дисперзија на звучниот бран во каналот.



Слика 5-3: Поставување на мерен инструмент за бучава Bruel&Kjaer од Класа 1

5.2. ПРИМЕНА НА АДАПТИВНИТЕ АЛГОРИТМИ

Активната контрола на звукот претставува парадигмичен проблем на адаптивната обработка на сигналот, каде што контролниот систем во реално време генерира сигнал со иста фреквенција, но спротивна фаза од примарниот, со цел да постигне отстранување на несаканиот звук (примарен звук) во посакуваната зона. Анти-шумот генериран од контролниот извор, со цел да стигне до тивката точка се шири низ електро-акустична средина, наречена секундарна патека. Звукот добиен во „тивката зона“ се нарекува секундарен звук. Во оваа зона, примарниот звук и секундарниот звук се комбинираат еден со друг за да формираат преостанат звук преку принципот на деструктивна интерференција на звукот. Во таа зона е поставен микрофон за грешка, со цел да го измери интензитетот на звукот кој е преостанат. Со примена на стандардните адаптивни алгоритми за активна контрола на звукот, преостанатиот звук се минимизира преку прилагодување на контролниот извор на звук (на пример, алгоритмот на најмали средни квадрати (LMS) го минимизира квадратот на преостанатиот шум).

Врз основа на тоа дали постои референтен сензор што се користи за добивање на информации за примарниот звук, системите за активна контрола може да се категоризираат во два вида, имено, системи со повратна врска и системи со директна врска. Системите со директна врска се состојат од еден референтен сензор за преземање на референтниот сигнал и еден сензор за следење и прилагодување на системот. Меѓутоа, во некои случаи, референтниот сигнал не е достапен поради физичкото ограничување на поставувањето на референтниот сензор или неточноста во генерирањето на референтниот сигнал преку незвучни сензори. Овие проблеми може да се решат со користење на систем за активна контрола со повратна врска, во кој се користи само сензор за грешка. Во основа, овие системи се обидуваат да го проценат контролниот сигнал од сигналот за грешка. Дигиталната контрола со повратна врска, генерално користи внатрешна контрола на моделот, која го минимизира преостанатиот шум користејќи се со предвиден примарен звук како референтен сигнал. Оттука, системот со повратна врска може да го намали само предвидливиот шум (подразбирајќи синусоидни и теснопојасни звуци) [185]. Од друга страна, пропусниот опсег што може да се контролира со системот е ограничен поради големото доцнење поради аналого-дигиталниот преобразувач (ADC) и дигитално-аналогниот (DAC) преобразувач.

Неизбежен сегмент во системот на активна контрола на звукот кој мора да биде земен во предвид е секундарната патека, која претставува електро-акустичен сигнален канал кој го претставува повратниот пат на движење на звукот од контролниот извор на звук до саканата „тивка зона“. Од аспект на класичната контролна теорија, ефектот на секундарната патека на контролниот систем може да се поништи ако неговиот инверзен систем се постави пред контролниот извор на звук. Ова решение е тривијално бидејќи инверзниот систем може да биде некаузален или нестабилен. Едно алтернативно решение е филтрирање на референтниот сигнал со проценка на секундарниот импулсен

одговор и потоа напојување на стандарден адаптивен алгоритам од филтрираниот референтен сигнал наместо референтниот сигнал.

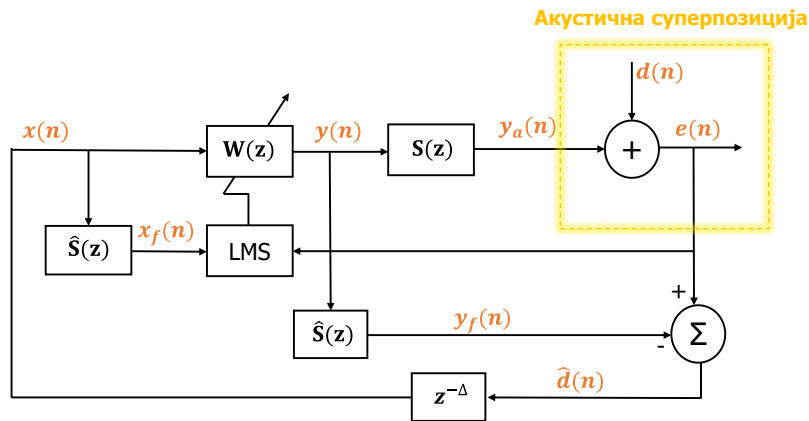
Ова решение води до серија адаптивни алгоритми познати како Filtered-x (FxLMS) адаптивни алгоритми [186]. До ваквите модели може да се дојде со помош на алгоритми за моделирање на секундарните патеки. Поради постоењето на електро-акустичната секундарна патека помеѓу контролниот сигнал и сензорот за грешка, во овој систем предложен е алгоритмот FxLMS со цел да се неутрализира ефектот на секундарната патека. Во алгоритмот FxLMS, потребен е проценет модел на секундарната патека за одржување на стабилноста на системот. Овој модел вообичаено се добива со користење или онлајн или офлајн техники за идентификација на системот.



Слика 5-4: Блок-дијаграм на моделирање на секундарната патека

Во многу апликации, вистинскиот модел на детерминирање на секундарната патека е временска варијанта, така што неговиот модел треба да се ажурира за време на работата на системот за активна контрола. Во спротивно, системот може да стане нестабилен или неговите перформанси може да се намалат. Генерално, ваквите алгоритми може да се категоризираат во две главни класи: алгоритми без додавање на шум и алгоритми со додавање на шум. Во алгоритмите со додавање на шум, вообичаено бел шум кој не е во корелација со примарниот звук се испушта во секундарната патека. Потоа се користи адаптивен филтер за да се изгради моделот на секундарната патека преку анализа на влијанијата на додадениот шум врз преостанатиот звук. Во овој случај, системот за целосна контрола се состои од два адаптивни алгоритми: алгоритам за моделирање на секундарната патека (Слика 5-4) и алгоритам за активна контрола (Слика 5-5). Главниот недостаток на ваквите системи е потенцијалното меѓусебно мешање помеѓу двата алгоритми, што може да доведе до ниска стапка на конвергенција на алгоритмот за моделирање на секундарната патека. Друг недостаток на алгоритмите со додавање на шум е тоа што шумот се појавува во „тивката зона“, поставувајќи горна граница на максималниот степен на намалување на звукот кој може да се постигне. Конечно, алгоритмите со додавање на шум бараат и претходно иницирање на моделот на

секундарната патека бидејќи тие се способни да следат само мали промени во секундарната патека [187].



Слика 5-5: Блок-дијаграм на моделирање на системот со повратна врска за активна контрола со FxLMS алгоритмот

Присутството на преносната функција на секундарната патека $S(z)$ по контролерот предизвикува нестабилност на LMS алгоритмот. Ова се јавува поради тоа што сигналот на „грешката“ не е коректно нивелиран во времето со референтниот сигнал поради присутството на $S(z)$. Поради тоа, се предлага естимација на секундарната патека $\hat{S}(z)$ со цел филтрирање на референтниот сигнал $x(n)$ за надоградувањето на тежинските коефициенти на LMS алгоритмот, што резултира во FxLMS алгоритмот. На блок-дијаграмот на Сликата 5-5 е претставен FxLMS базиран систем за активна контрола. Тој се состои од еден сензор за звук и еден контролен звучник. Главната идеја на овој систем е да направи естимација на примарниот (влезен) звук $d(n)$ базиран на сигналот на грешка $e(n)$ и излезниот сигнал од адаптивниот филтер $y(n)$, каде n е временскиот индекс, и употребата на задоцнетата верзија на естимираниот влезен сигнал $\vec{d}(n)$ како референтен сигнал $x(n)$ во адаптивниот филтер $W(z)$. Иако е задоволено $S(z) = \hat{S}(z)$, физичката патека од контролниот извор до сензорот на грешка доведува некое временско задоцнување поради времето на пропација на звукот, па синтетизираниот референтен сигнал е одложена верзија на примарниот сигнал, т.е $x(n) = d(n - \Delta)$, а Δ е апроксимираното временско задоцнување на $S(z)$. Така, системот базиран на внатрешниот модел станува адаптивен предиктор (предвидувач) на $d(n)$ за да го минимизира резидуалниот звук $e(n)$ и неговиот перформанс зависи од предиктивноста (предвидливоста) на примарниот звук. Познато е дека $d(n)$ не мора да е комплетно предиктивен во реални услови и поради тоа совршено поништување на примарниот звук вообичаено е непрактично. Од друга страна, идеална естимација на секундарната патека е исто така тешко да се постигне во пракса, бидејќи одговорот на секундарната патека може да биде временски променлив, па поради ова непоклопувањето помеѓу одговорот

во вистинскиот секундарен пат и неговата естимација секогаш постои, а ова може да влијае на ефикасноста на системот.

На дијаграмот прикажан на Слика 5-5 со непрекината зелена линија е прикажана акустичната суперпозиција. Внатрешно пресметаниот референтен сигнал $x(n)$ во системот може да се изрази како: $x(n) = \hat{d}(n - \Delta) = e(n - \Delta) - y_f(n - \Delta)$, каде $y_f(n) = \vec{s}^{-T} \vec{y}(n)$ е естимираниот анти-звучен сигнал добиен преку филтрирање на сигналот на излез на адаптивниот филтер $y(n)$. $\hat{s} = [\hat{s}_0 \ \hat{s}_1 \ \hat{s}_{N-1}]^T$ е векторот на коефициенти со должина N кој го естимира импулсниот одговор на вистинската секундарна патека, $y(n) = [y_n \ y(n-1) \ y(n-N+1)]^T$ е векторот на излезниот сигнал на адаптивниот филтер, а суперскриптот T се однесува на операција транспонирање. Излезниот сигнал $y(n)$ на адаптивниот филтер $W(z)$ кој исто така се однесува на сигналот за поништување се добива како:

$$y(n) = \vec{w}^T(n) \vec{x}(n) \quad (5.1)$$

каде $x(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L+1)]^T$ е векторот на референтниот сигнал и $w(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ \dots \ w_{L-1}(n)]^T$ е адаптивниот тежински вектор. Тука, L се однесува на должината на адаптивниот филтер. Тежинскиот вектор $w(n)$ се обновува базирано на FxLMS алгоритмот, изразено како:

$$\vec{w}(n+1) = \vec{w}(n) + \mu e(n) \vec{x}_f(n) \quad (5.2)$$

каде μ е големината на чекорот (факторот на конвергенција) кој ја определува брзината на конвергенција, $\vec{x}_f(n) = [x_f(n) \ x_f(n-1) \ \dots \ x_f(n-L+1)]^T$ е филтрираниот вектор на референтниот сигнал. Сигналот на грешка $e(n)$ се добива како:

$$e(n) = d(n) + y_a(n) \quad (5.3)$$

каде $y_a(n)$ е вистинскиот сигнал на анти-звукот даден со:

$$y_a(n) = \vec{s}^T \vec{y}(n) \quad (5.4)$$

$\vec{s} = [s_0 \ s_1 \ \dots \ s_{M-1}]^T$ е векторот на коефициенти со должина M кој го претставува импулсниот одговор на реалната секундарна патека. Во практичните апликации на активна контрола, моделот на секундарната патека \vec{s} претставува скратена верзија на реалната секундарна патека s што значи дека $N < M$. Поради тоа што секундарната патека $S(z)$ се претпоставува дека е позната и нејзиниот модел $\hat{S}(z)$ се добива преку офлајн

моделирање, а коефициентите на нивните вектори s и \hat{s} се независни од временскиот индекс n .

Имајќи ги во предвид овие анализи, системот за активна контрола кој го применува FxLMS алгоритмот бара точна естимација на моделот на секундарната патека. Поради ограничувањата на бавната адаптација, FxLMS алгоритмот ќе конвергира помеѓу $\pm 90^\circ$ на фазна грешка помеѓу $\hat{S}(z)$ и $S(z)$. Поради тоа, офлајн моделирањето на секундарната патека користи идентификација на секундарната патека со LMS алгоритмот и бел шум (широкопојасен звук, константна спектрална густина на сите фреквенции) како возбуден сигнал кој се користи за естимација на $S(z)$ во иницијалната фаза на тренирање на системот пред примената на активната контрола. Но, кај апликации кои имаат значителна временски-променлива секундарна патека и бараат висок перформанс, онлајн моделирањето за време на работата на системот за активна контрола може да биде потребно.

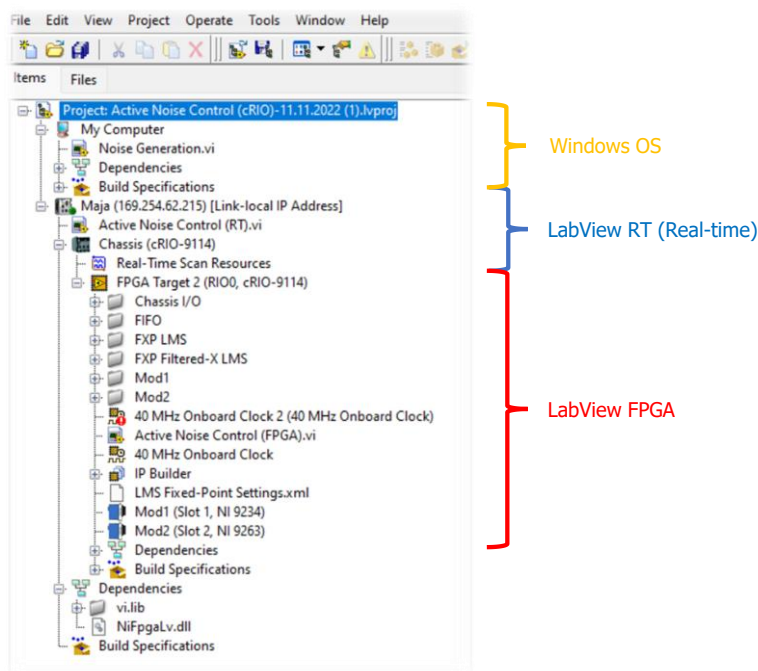
5.3. LABVIEW МОДЕЛ ЗА КОНТРОЛА НА СИСТЕМОТ

LabVIEW програмската околина претставува предводник на графичките програмски јазици наменети за виртуелна инструментација. Тој овозможува голема слобода при развојот на виртуелните инструменти од изглед на корисничкиот интерфејс до програмската структура. Изгледот на LabView моделот на експерименталниот систем за активна контрола LabVIEW е составен од преден панел на кој е поставен корисничкиот интерфејс, и блок-дијаграм кој ја претставува програмата на виртуелниот инструмент. Со LabVIEW се развиваат модуларни програми, односно проблемот се дели во помали делови (модули) кои извршуваат одредена функција. LabVIEW Real-time (LabVIEW RT) процесорот е наменет за креирање на мерни системи кои мерат во реално време. Целта на LabVIEW RT е развој на апликации со точно зададено време на извршување. Ова е специјален начин на LabVIEW програмирање и е карактеристичен за хардверскиот модул cRIO 9022 кој е искористен. Од друга страна, cRIO 9022 покрај RT модулот, содржи и FPGA чип како технологија која овозможува примена на напредни алгоритми за процесирање и управување.

Софтверската архитектура на проектот во LabView се состои од 3 програми сместени на три различни локации: Windows оперативен систем, FPGA чип и RT процесор (Слика 5-6). FPGA виртуелниот инструмент ги дефинира влезно излезните канали кои се користат, како и стапката на земање на одбиороци. Преку одреден механизам за зачувување треба овие податоци да се пренесат надвор од FPGA чипот.

RT виртуелниот инструмент служи да одржување на детерминизмот како, одредување на бројот на одбиороци кои се читаат при пренос со зачувувањето на податоците. Исто така, RT виртуелниот инструмент се употребува за визуелизација, постпроцесирање, зачувување во датотеки. Но, поради комплексноста на овие операции, визуелизацијата

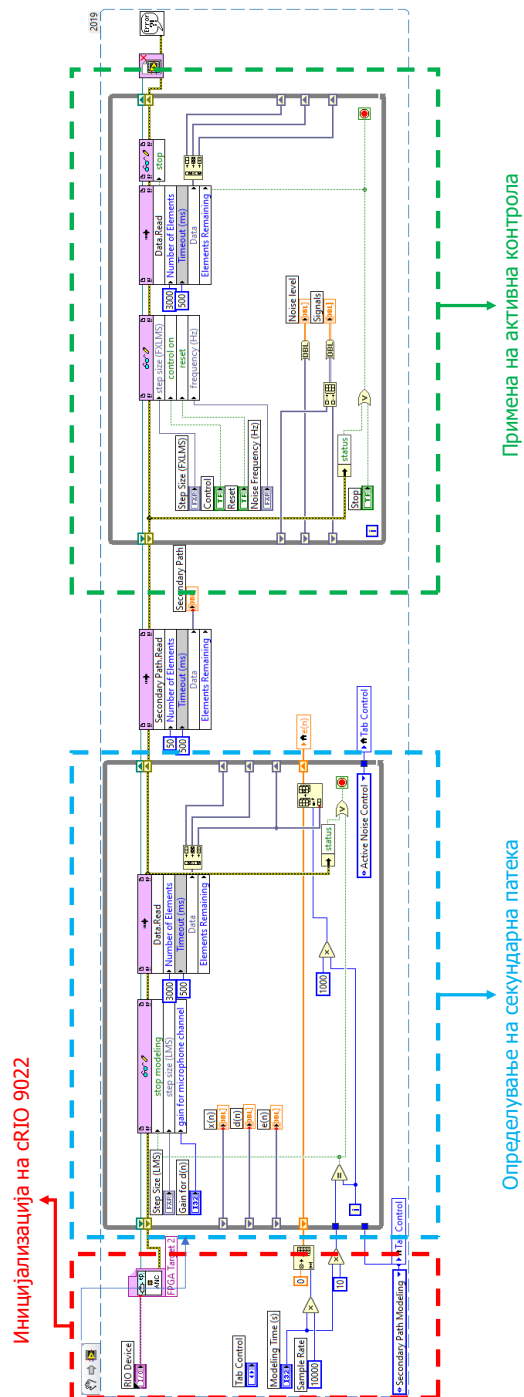
се извршува во посебен виртуелен инструмент на Windows оперативниот систем, односно на самиот персонален компјутер (Слика 5-6).



Слика 5-6: Структура на програмската околина во LabView

На Сликата 5-7 е претставен блок-дијаграмот на виртуелниот инструмент од RT модулот кој е искористен за моделирање на активната контрола на системот [188]. Имено, може да се забележи дека првата фаза во развојот на кодот претставува иницијализацијата на cRIO 9022 модулот. Понатаму, втората фаза претставува делот од виртуелниот инструмент кој се користи за определување на секундарната патека на системот. Оваа фаза се користи за определување на физичките карактеристики на просторот помеѓу контролниот (управувачки) звучник и микрофонот преку испуштање на бел шум од контролниот звучник како што е веќе објаснето. Како влезни параметри во оваа фаза се користат времето на моделирање и коефициентот на LMS контролниот алгоритам за определување на коефициентите на секундарната патека. Понатаму, откако системот ги детектира карактеристиките на зоната во која треба да се изврши активната контрола на звукот, преминува во третата фаза. Во третата фаза, примарниот звучник генерира звучни сигнали кои може да се генерираат од посебен виртуелен инструмент креиран во LabView, но може да се генерираат и независно од LabView програмата, како што е спроведено при изведба на овој експеримент. Звучниот сигнал од примарниот звучник е генериран од сигнал генераторот и претставува влезна мерна големина во звучниот сензор (микрофон). Во оваа фаза од RT виртуелниот инструмент, се применува FxLMS контролниот алгоритам за определување на поништувачкиот звук, кој крајно се генерира од контролниот (управувачки) звучник. На крајот од секоја фаза,

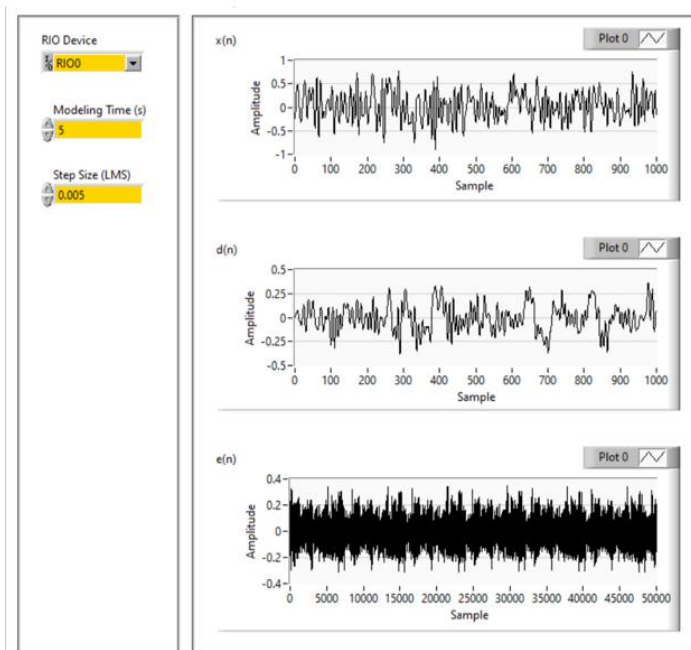
резултатите од соодветната се прикажани на графичкиот интерфејс на контролниот панел на RT виртуелниот инструмент.



Слика 5-7: Блок-дијаграм на реално-временскиот модел од системот

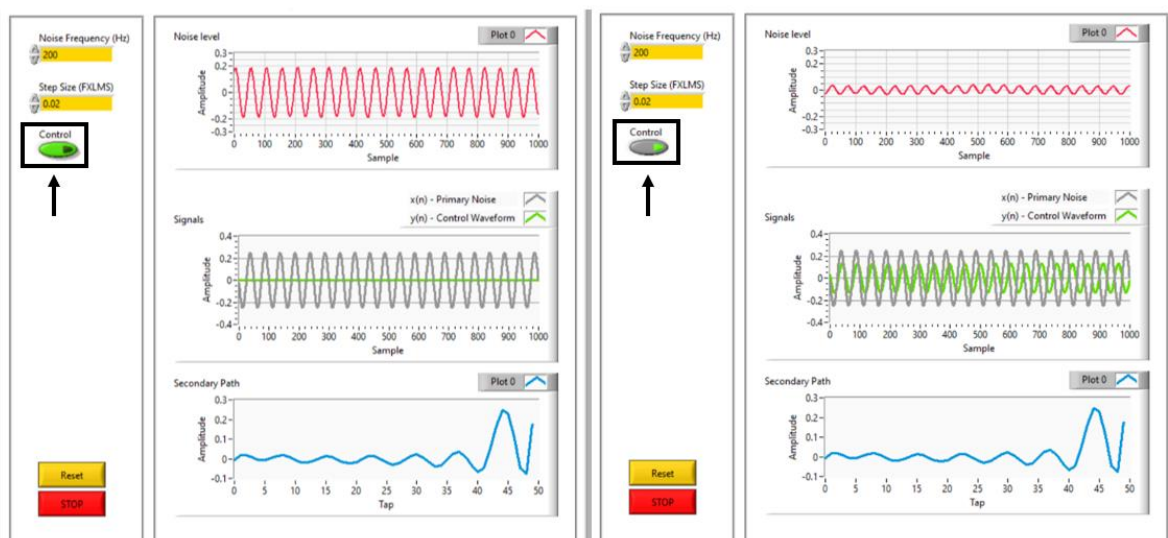
На Слика 5-8 е прикажан корисничкиот интерфејс, односно предниот панел од виртуелниот инструмент за втората фаза од блок дијаграмот. Имено, тука се внесуваат

влезните параметри за големината на коефициентот на LMS алгоритмот и времето на моделирање. На графициите се прикажани амплитудно-временскиот влезен сигнал од белиот шум кој се генерира од контролниот звучник, низводно кон примарниот звучник, потоа измерениот сигнал кој стигнува до микрофонот и разликата во двата звучни сигнали соодветно. Како што беше споменато, оваа фаза се користи за детерминирање на карактеристиките на секундарната патека, додека тука не се случува контрола на звучниот сигнал.



Слика 5-8: Кориснички интерфејс за фазата на определување на секундарната патека

На Слика 5-9 се прикажани корисничките интерфејси за предниот панел од RT виртуелниот инструмент за третата фаза каде се имплементира активната контрола. Како влезни параметри во оваа фаза се фреквенцијата на сигналот, големината на чекорот на FxLMS контролниот алгоритам и прекинувачот за вклучување/исклучување на контролниот звучник, односно активирање и деактивирање на активната контрола. Имено, моделот за активна контрола на акустичната средина прикажан тука, заедно со експерименталната постулација ја имплементираат контролата со повратна врска, која подразбира дека звучниот сигнал кој се генерира од примарниот звучник е чист периодичен сигнал со позната фреквенција. Имајќи го ова во предвид, како влезен податок во системот се задава фреквенцијата на звучниот сигнал кој се генерира. Големината на чекорот на FxLMS контролниот адаптивен алгоритам зависи од фреквенцијата на примарниот звучен сигнал, резултирајќи во различен перформанс на активната контрола на системот при различни големини на чекорот за различни побудни фреквенции. Тој се нивелира во зависност од фреквенцијата на генерираниот звучен сигнал од примарниот звучник со цел да обезбеди оптимална работа на системот.



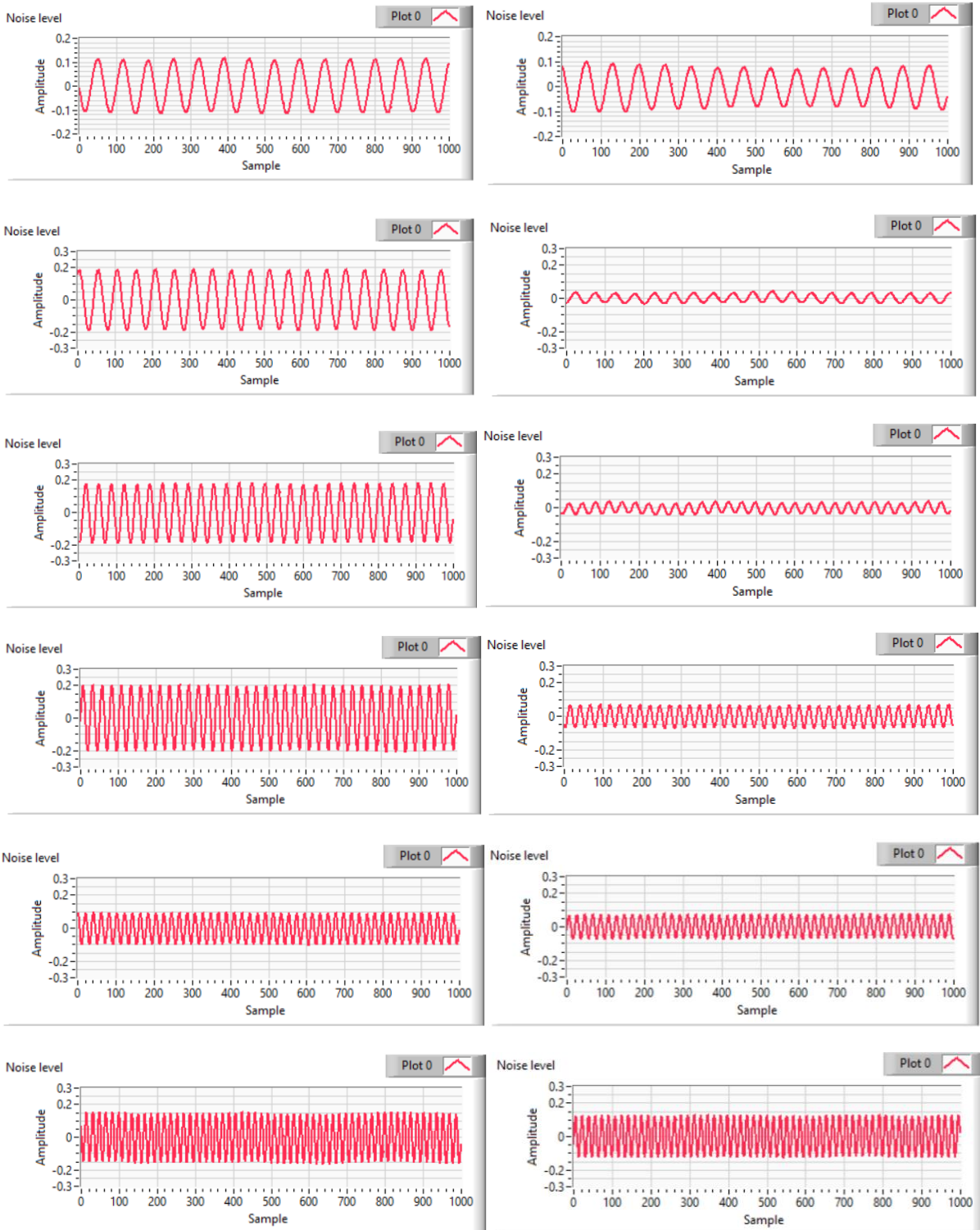
Слика 5-9: Кориснички интерфејс за фазата на спроведување на активната контрола

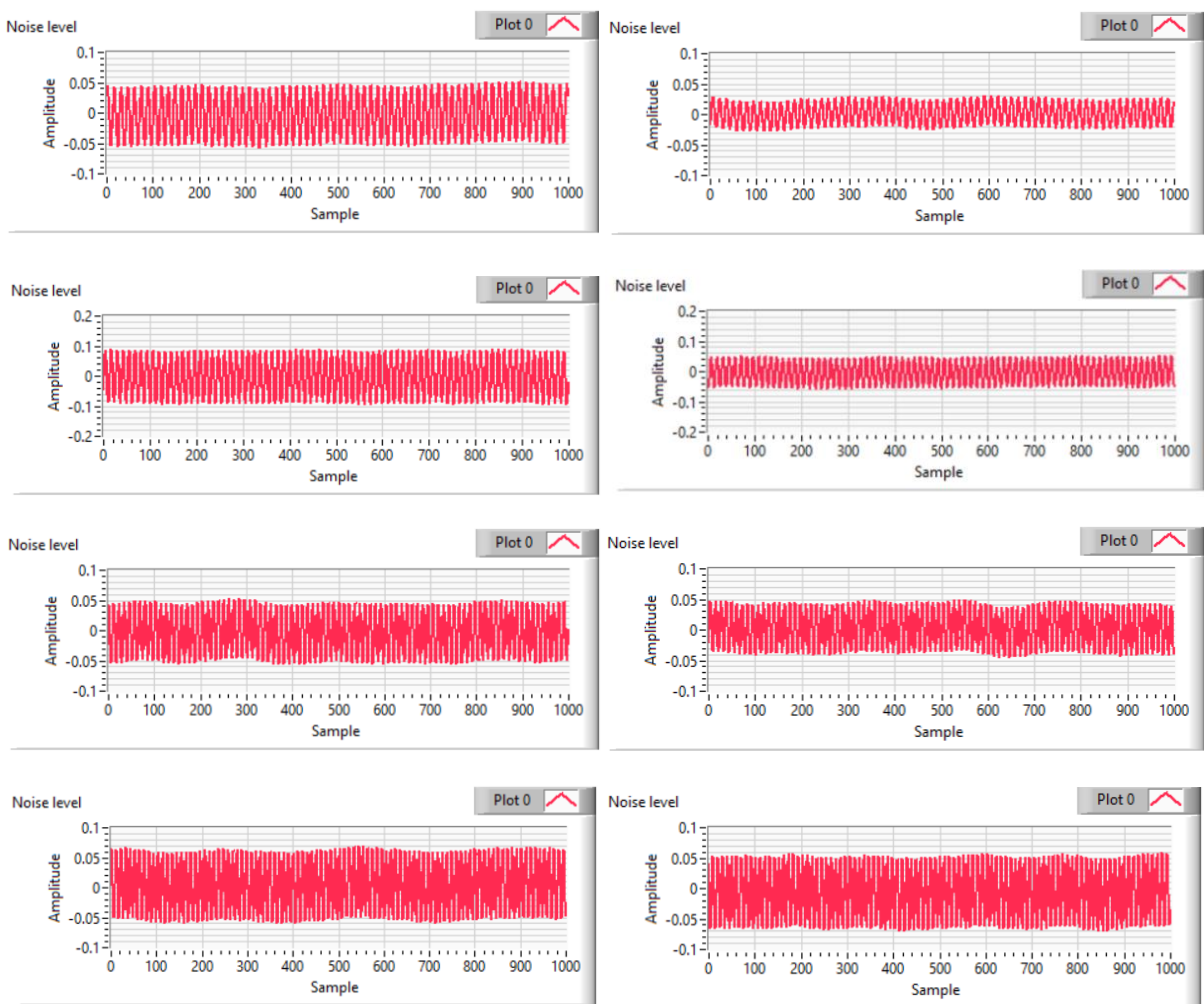
На Слика 5-9 е прикажан корисничкиот интерфејс за фазата каде се применува активната контрола на системот. На првите графици со црвена боја на двете слики (лево и десно) од Слика 5-9 се прикажани нивоата на звучен сигнал пред (лево) и по (десно) активирање на активната контрола на системот во реално време за избрана репрезентативна фреквенција од 200 [Hz]. Резултатите за нивото на намалување се објаснети подолу. На вторите графици со сива и зелена боја соодветно се прикажани амплитудно-временските графички репрезентации на примарниот и контролниот звучен сигнал. На третите графици најдолу со сина боја се прикажани коефициентите на секундарната патека определени со LMS и FxLMS контролните адаптивни алгоритми.

5.4 РЕЗУЛТАТИ

Перформансите на креираниот експериментален систем, како и софтверскиот модел кои се опишани погоре, се тестирани преку примена на 10 чисти синусоидни функции со фреквенции во рангот од 100 до 1000 [Hz]. Имено, на примарниот звучник во експерименталниот систем доведени се чистите тонови преку нивно симулирање од генераторот на сигнали, спроведени преку аудио појачувачот. Влезните сигнали се доведени со иста амплитуда на функцискиот генератор од 80 [mVrms] и иста амплитуда на аудио појачувачот. Може да се забележи дека амплитудата на сигналите на различни фреквенции измерена во моделот во LabView е различна, а тоа се должи во разликите во звучноста на сигналот на различни фреквенции. На графиците на Слика 5-10 е прикажана графичка визуелизација на амплитудно-временските сигнали на сите тестирани влезни сигнали (100 [Hz], 200 [Hz], 300 [Hz], 400 [Hz], 500 [Hz], 600 [Hz], 700 [Hz], 800 [Hz], 900 [Hz], 1000 [Hz]) пред (лево) и по (десно) примена на активната

контрола во моделот редоследно, каде е забележителна разликата во интензитетот на амплитудите пред и по примена на контролата во моделот.



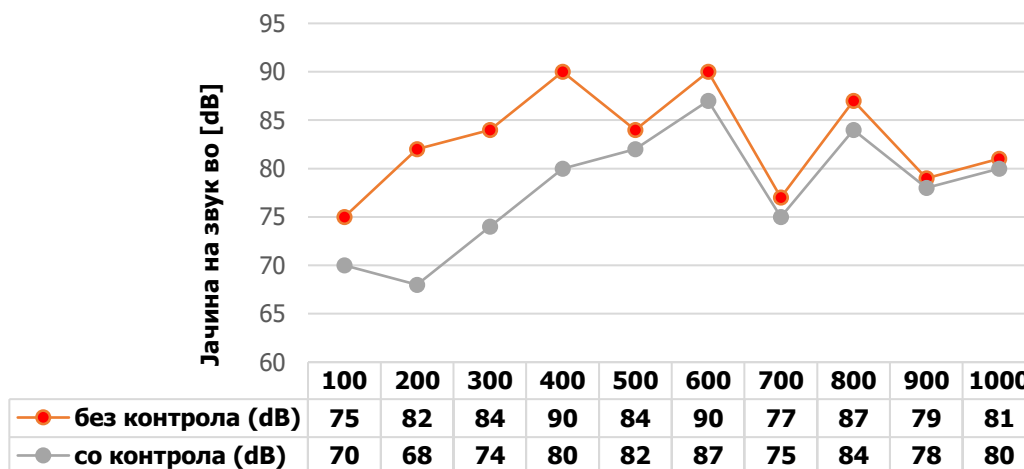


Слика 5-10: Временско-амплитудни сигнали на јачината на звукот на сите 10 тестирани фреквенции во LabView моделот пред и по примена на активната контрола

На Слика 5-11 се прикажани квантифицирани резултатите од намалувањето на јачината на звукот за сите тестирани фреквенции. Нивото на јачина на звукот во [dB] е мерено со помош на мерен инструмент од Класа 1 од Bruel&Kjaer. Тоа е изразено во L_{AF} параметарот, кој го претставува максималното ниво со А-тежинска фреквентна крива и F брзинска карактеристика на мерење, претставено во [dB]. Од резултатите прикажани на сликата може да се заклучи дека најголемо и значително намалување е забележано на фреквенциите од 200 [Hz], 300 [Hz] и 400 [Hz], додека на повисоките фреквенци над 400 [Hz] разликите во нивото на јачина на звук се помали.

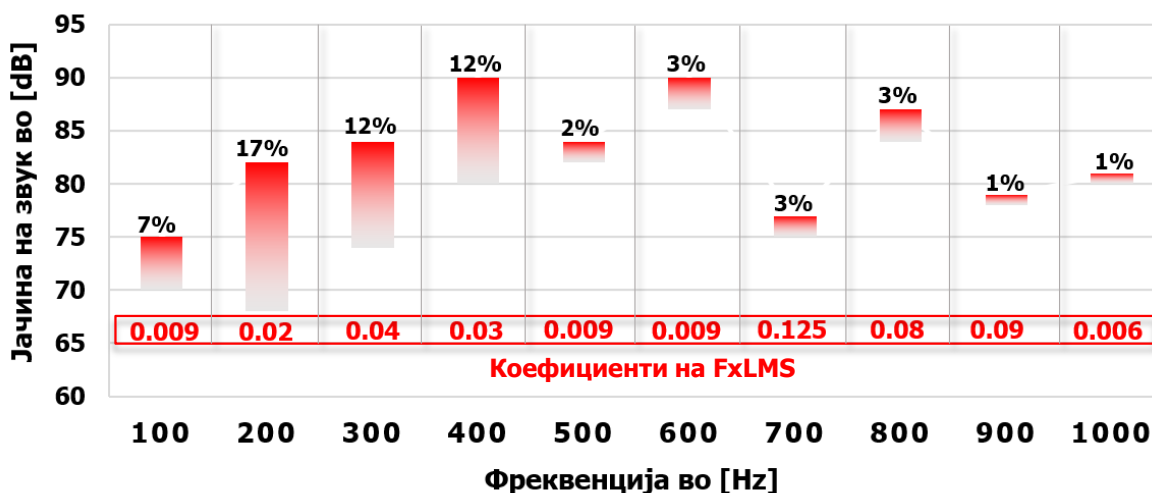
Исто така, покрај влијанието на намалувањето на јачината на звукот, коефициентите на адаптивниот алгоритам FxLMS покажуваат значително влијание и врз брзината на конвергенција на тежинските коефициенти и стабилноста на системот. Ефектите на FxLMS алгоритмот покажаа и сериозни и импликации врз перформансот на системот. Тоа значи дека наместо деструктивна интерференција на брановите, забележана е

конструктивна интерференција поради неправилно постигнување на анти-фазен контролен сигнал. Ова резултира во амплификација на звукот, наместо негово намалување.



Слика 5-11: Компарација на нивото на јачина на звукот на тестираните фреквенции пред и по примена на активната контрола

При тестирање на системот на различните фреквенции, беше заклучено дека врз намалувањето на нивото на јачината на звукот на сите фреквенции најголемо влијание имаат зададените вредности за коефициентот на FxLMS адаптивниот алгоритам. Имено, оптималните резултати за најголемо намалување на јачината на звукот беа добиени со нивелирање на коефициентите на алгоритамот.



Слика 5-12: Процентуално намалување на нивото на јачина на звукот

На Сликата 5-12 се прикажани резултатите на намалување на звукот кои се постигнати за сите фреквенции изразени процентуално. На сликата се прикажани и вредностите за коефициентите на FxLMS алгоритмот за кои овие намалувања се постигнати.

Од резултатите, може да се забележи дека најголемо намалување е постигнато на фреквенција од 200 [Hz] кое е 17% или 14 [dB]. Значително намалување на звукот е постигнато и на 300 [Hz] и 400 [Hz] кое е 12%, односно 10 [dB] во двата случаи. На сите фреквенции над 400 [Hz], дури и со варијации на коефициентот на FxLMS алгоритмот, максималните намалувања кои беа постигнати се во рангот од 1% до 3%.

5.5. ЗАКЛУЧОЦИ

Во ова Поглавје е претставена анализа на експерименталната имплементација на активен систем за контрола на акустична средина во канал. Кај овој систем, потребата за многу точни амплитудни и фазни односи помеѓу сигналот од примарниот извор на звукот и генерираниот контролен звучен сигнал, како и временските карактеристики на системските елементи кои варираат во време, води кон примена на адаптивните дигитални филтри. Со цел потврдување на перформансите и брзината на конвергенција на адаптивните алгоритми за обработка на сигнали, како и испитување на добиените теоретски резултати, имплементиран е адаптивен активен систем за контрола на звучната средина во реално време со контрола на повратната врска. Оваа студија покажа дека комбинацијата FPGA модулот и Real-time модулот на cRIO од National Instruments и LabView софтверската околина има добар потенцијал за имплементација на својата процесорска ефикасност при примена во адаптивните системи за активна контрола на акустична средина во реално време.

Во овој труд е анализиран поедноставен систем за адаптивна активна контрола со повратна врска, кој подразбира прифаќање на сигналот за грешка директно како референтен сигнал. Тоа е поволно во пресметковното оптоварување и леснотијата на имплементација, иако во практичните системи за активна контрола на звукот може да се добие само одредено ниво на суспензија на акустичната средина. Валидноста на користењето на предложениот систем е прикажана експериментално, со примена на системот за контрола на акустична средина во канал за влезни звучни сигнали со тесен фреквентен опсег, односно со чисти синусоидни сигнали. При имплементација на системот за активна контрола е применет концептот за неутрализација на секундарната патека која неизбежно се јавува поради повратната акустична енергија од секундарниот извор кон сензорот за звук и може да ја деградира и дестабилизира моќта на системот. Ова е изведено користејќи ги перформансите на FxLMS адаптивниот алгоритам. Покажано е дека со параметризацијата на големината на чекорот на FxLMS адаптивниот алгоритам во голема мера влијае на оптималната работа на системот и со негово правилно нивелирање се постигнува неутрализација на секундарната повратна патека. Експерименталните резултатите кои се добиени од спроведеното испитување сугерираат

на солидна ефикасност на системот на пониски фреквенции во рангот од 200 до 400 [Hz], каде се достигнува намалување на звучниот интензитет до максимални 17% на фреквенција од 200 [Hz].

Преку експерименталните резултати прикажани во ова Поглавје се потврдуваат заклучоците од МКЕ анализата приложена во Глава 3, каде беше предвидена ефикасност на системот за фреквенции под 400 [Hz] (Слика 3.13). Од друга страна, предложениот LMS алгоритам анализиран во Глава 4 покажа солидни перформанси, исполнувајќи ги целите за постигнување на стабилен систем кој е способен да спроведе контрола на акустичната средина во реално-временски услови.

Овој пристап на реализација на системот за активна контрола на акустичната средина во канал со предложените карактеристики, предлага робусна методологија за контрола на акустична средина, со цел да се предложи решение кое е лесно за имплементација во апликации во реално време. Успешната примена на предложените теоретски резултати од претходните истражувања ги докажува веродостојноста и валидноста на спроведената анализа.

6

ЗАКЛУЧОЦИ И ПРЕПОРАКИ ЗА ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА

Оваа докторска дисертација претставува допринос во научно-истражувачката и апликативната област посветена на системите за активна контрола на акустична средина. Анализите и истражувањата спроведени во неа резултираат во развој и примена на експериментален систем за активна контрола на акустична средина во реално-временски услови кој ја докажува изводливоста на ваквите системи, а потенцијално и неговата примена во пошироки инженерски апликации.

Спроведените анализи и мерења поврзани со стандардните методи за контрола на непосакуваниот звук во животната средина доведоа до заклучокот дека ваквите решенија се недоволни во справувањето и контролата со истиот. Поради тоа, во оваа докторска дисертација е предложено решение за справување и контрола со акустичните средини преку имплементација и тестирање на експериментален електро-акустичен систем.

Со спроведените анализи и резултати претставени преку софтверско моделирање и симулација на акустична средина со одбрани карактеристики, беа утврдени условите за апликација на системот за активна контрола. Ова беше извршено со цел да се направи идентификација на техничките предизвици преку кои се обезбедуваат соодветни услови за оптимална имплементација на системот со што подобри перформанси.

Примената на различните адаптивните алгоритми како неизбежен дел од системите за активна контрола на звукот беше анализирана преку спроведено софтверско моделирање. Резултатите и заклучоците од овие анализи наведоа на препознавање на предностите и недостатоците на анализираните алгоритми кон нивна примена во експерименталниот модел на системот кој беше развиен понатаму.

Сите спроведени прегледи и анализи послужија во реализацијата на физичкиот експериментален систем за активна контрола на едно-димензионална акустична средина во реално време. Крајно, со реализација на овој систем кое подразбира овозможување на контрола на звучната средина во посакуваната „тивка зона“, беа постигнати целите на ова научно истражување во рамките на оваа докторска дисертација.

6.1. ЗАКЛУЧОЦИ

Прегледот на многубројните научни истражувања, како и стандардите поврзани со заштитата и контролата на бучавата изложен во рамките на оваа докторска дисертација, овозможи креирање на методологија за проценка на ефектите од конвенционалното справување со непосакуваниот звук. Од друга страна, овие опсежни анализи посочија кон потребата за понатамошните истражувања со цел донесување на компаративни заклучоци и согледување на потребата од развој на нови, поефикасни методи за справување со бучавата.

Спроведените анализи на методите за мапирање на бучавата, укажаа дека тоа е погодна техника која овозможи донесување заклучоци за генералната состојба со бучавата во испитуваното подрачје преку лесно достапно собирање на информации и визуелизација на истите. Од друга страна, евалуацијата на овие резултати придонесе кон развој на нови идеи во насока на валидација на оваа методологија со користење на конвенционална методологија заснована на физички мерења.

Консекутивно, деталното истражување и анализа на стандардите и националните регулативи поврзани со применуваните решенија за проблемот со зголемено ниво на бучава насочија кон пристапот на теренски испитувања на инсталацијата на звучни бариери. Согласно спроведеното истражување каде се изложени резултатите од физичките мерења на карактеристиките и ефикасноста на звучните бариери, донесени се заклучоци за нивниот перформанс. Испитуваните звучни бариери покажуваат солидни карактеристики со степен на намалување на бучавата и за повеќе од 10 [dB] во целиот фреквентен опсег, но тие се далеку поефикасни за намалување на бучавата со високи фреквенции за разлика од онаа со пониски фреквенции. Ова води кон главниот заклучок дека нивната примена не е доволна за комплетна заштита и контрола од бучавата. Имајќи го ова во предвид, недостатоците на звучните бариери кои се класифицираат во методи за пасивна контрола со бучавата, отвораат нови можности за надоградување во полето на контрола на бучавата користејќи нови, модерни пристапи. Научно-истражувачката работа понатаму е насочена кон развој на системи за активна контрола на звукот, чија цел е подобрување на класичните методи за справување со проблемот од непосакувани звуци.

Реализацијата на системите за активна контрола на акустична средина бара солидно познавање на физиката на дисперзија на звукот, како и физичките и техничките карактеристики на средината во која системот ќе биде потенцијално имплементиран. За таа цел, преку претходни анализи на истражувањата во областа, претставени се аспектите на моделирање и симулација на предложената акустична средина со примена на методот на конечни елементи. Оттука, донесени се заклучоци за физибилноста на предложениот систем, како и можностите и предизвиците при негова изградба и функционалност. Дизајнот на систем за активна контрола на звук вклучува разгледување и исполнување на неколку различни акустични цели во насока на реализација на

системот. Од една страна, со помош на софтверско моделирање е стекнат увид во ограничувањата во перформансите при негова апликација. Но, од друга страна, овие резултати отворија простор кон разгледување на потенцијалот на примената на контролни адаптивни алгоритми при неговото дизајнирање со цел компензација на строгите физички и технички гранични услови.

Согледувањата на физичките и техничките услови за реализација на активен систем за контрола на звук преку моделирање на акустичната средина со помош на методот на конечни елементи, наведоа на потреба за анализа на можностите на контролните алгоритми кои се користат за постигнување на овие барања. Преку имплементација на хардверски пристап за аквизиција на звучни сигнали, постигнато е софтверско моделирање и симулација на можностите на адаптивните контролни алгоритми при нивна примена за намалување на звукот. Од презентираниот пристап на примена на различни адаптивни алгоритми и анализата на нивното однесување за различни карактеристики на звукот, беа донесени заклучоци за нивните предности и недостатоци. Резултатите сугерираат на позитивни аспекти и можности на анализираните адаптивни алгоритми за процесирање и контрола комплексни аудио сигнални карактеристики со потенцијал за примена на системот за активна контрола во реално-временски услови.

Крајно, пристапот кон реализација на системот за активна контрола на предложената едно-димензионална акустична средина во реално време, предлага робусна методологија за контрола на акустична средина со решение кое е лесно за имплементација. Имено, резултатите од софтверското моделирање и симулација на карактеристиките на акустичната средина со методот на МКЕ беа потврдени и при експерименталното моделирање на системот. Исто така, предложениот избор за адаптивен алгоритам од моделирањето и симулацијата на системот за активна контрола, ја потврди својата применливост во експерименталниот систем преку обезбедување на стабилни услови за реално-временска апликација. Од ова може да се заклучи дека успешната примена на резултатите од претходно спроведените теоретски анализи во имплементираниот систем за активна контрола на звучната средина во реално време ги покажува веродостојноста и валидноста на заклучоците од истите.

Спроведените истражувања изложени во оваа докторска дисертација сугерираат на постоењето на многу предизвици во развојот на успешен систем за активна контрола на акустична средина. Тука се вбројуваат теоријата на акустиката поврзана со адаптивните алгоритми, физичките и техничките карактеристики на системот со цел постигнување на оптимални перформанси, постигнувањето на брза конвергенција и робусно управување за да се достигнување на максимално намалување на звукот во посакуваната зона во временски променлива средина, како и размислувања за имплементација на истиот земајќи ја во предвид сложеноста на системот и трошоците кои произлегуваат од неговата изведба. Континуируваниот напредок на овие системи вклучува развој на подобрени адаптивни алгоритми за обработка на стохастичните сигнали кои се последица на природата на звукот, развој на нови сензорски технологии и хардверите за

обработка и процесирање на дигиталните сигнали во реално време. Неретко, согласно истражувањата во литературата, однесувањето на реалните и апликативни системи не се совпаѓа со она кое е добиено од достапните теоретски анализи. Ова е воглавно затоа што теоретските анализи, моделирања и симулации се спроведени врз основа на поедноставни претпоставки во врска со однесувањето на звучните сигнали. Заклучоците од овие истражувања доведоа кон обрнување на вниманието кон условите во кои системот останува стабилен и обезбедување на оптимален избор и правилна примена на адаптивните алгоритми за негова реализација. Имајќи ги во предвид овие аспекти, со предложениот експериментален модел на адаптивен систем со повратна врска е реализиран концептот за неутрализација на секундарната патека. Ова неизбежно се јавува поради повратната акустична енергија од секундарниот извор кон сензорот за звук и може значително да ја деградира и дестабилизира моќта на системот. Покажано е дека со правилна параметризацијата на адаптивните алгоритми може во голема мера да се влијае на оптималната работа на системот со минимизирање на овој ефект. Преку спроведеното тестирање на системот во дефинираниот фреквентен ранг, се укажува на негова ефикасност на пониски фреквенции, каде се достигнува значително намалување на интензитетот на звукот во предвидената зона. Експерименталните резултати кои се добиени од спроведеното испитување ги потврдија очекувањата на претходно спроведените теоретски испитувања и анализи.

Теоретските истражувања, моделите и симулациите спроведени во оваа докторска дисертација поткрепени со реализација на експерименталниот систем за активна контрола на акустична средина и неговата анализа, даваат свој придонес во полето на контрола на акустичните средини кое е несомнено многу актуелно во научно-истражувачката област во последните години. Важноста на сознанијата обезбедени во оваа докторска дисертација овозможуваат подобро разбирање на новите инженерски технологии и апликации во насока на продлабочување на теоретските анализи и експериментални решенија поврзани со активната контрола на звукот. Со докажување на веродостојноста на предложениот модел и развојот на овој систем, како и реализирањето на неговата функционалност, се укажува на потенцијалот и можностите за негова примена во реални инженерски апликации.

6.2. ПРЕПОРАКИ ЗА ИДНИ ИСТРАЖУВАЊА

Во текот на спроведувањето на истражувањата изложени во оваа докторска дисертација, беа согледани можностите и потенцијалот за надоградување на системот за активна контрола на акустична средина, како и спроведените анализи. Препораките кои се предложуваат како правец на идни истражувања се поделени во насока на предлози за подобрување на системот за активна контрола кој е реализиран и насока на креирање нов систем со проширени апликативни можности.

6.2.1. Подобрување на системот за активна контрола на акустична средина

Конвенционалните пасивни техники за справување и контрола со бучавата, подразбираат заштита од непосакуван звук на повисоки фреквенции, за карактеристични извори на бучавата кои се сметаат за најдоминантни за човечката вознемиреност. Во таа насока, се предлага подетална анализа на повеќебројните пасивни методи за контрола на бучавата покрај звучните бариери, која ќе послужи за стекнување подобар увид во нивниот перформанс и рангот на нивните можности. На овој начин, може да бидат донесени поспецифицирани заклучоци за нивните недостатоци, а истите ќе отворат нови можности и идеи за нивна компензација преку примена на системите за активна контрола на бучавата.

Техниката за моделирање и симулација на акустичната средина со примена на методот на конечни елементи ги збогати сознанијата за техничките можности и предизвици на предложениот систем. Како главен недостаток на овие анализи се истакнува неприсуството на системска контрола, па во таа насока се предлага интеграција на користениот софтвер со софтвер во кој може да се извршува симулација на контролните алгоритми. На овој начин би се добила поверодостојна визуелизација на однесувањето на акустичната средина пред и по примена на активната контрола. Истовремено, тоа би го олеснило и моделирањето на самата акустична средина преку лесна и брза модификација не само на физичките карактеристики на системот, туку и на карактеристиките на контролните алгоритми при различни физички услови на системот.

Примената на методот за моделирање и симулација на контролниот дизајн, создаде можност за здобивање на предзнаења за адаптивните алгоритми кои понатаму беа искористени при експерименталната реализација на системот. При анализа на резултатите добиени на овој начин, се доби идеја за зголемување на бројот, видот и карактеристиките на аудио сигналите кои беа интегрирани во моделот и нивно тестирање со дополнителни адаптивни алгоритми со различни карактеристики. Во оваа насока, се предлага проширување на ова истражување преку дополнување на базата на снимени аудио сигнали и нивно тестирање со повеќе различни алгоритми. На овој начин, со различни карактеристики на аудио сигнали и различни адаптивни алгоритми би се добил подетален увид во импликациите на нивните комбинации во целокупното однесување на системот. Ова би послужило во збогатување на анализите поврзани со влијанието на адаптивните алгоритми како неизбежен дел од системот за активна контрола во реално време и насока кон постигнување на максимален перформанс на системот.

Конечното подобрување на реализираниот експериментален систем за активна контрола во реално време несомнено зависи од продлабочувањето на секоја од претходно споменатите анализи. Од друга страна, техничката изведба на самиот систем зависи од изборот на харверските компоненти од кои тој е изграден и тие сериозно влијаат на просторното ограничување на акустичната средина која треба да биде

контролирана. Во овој случај, техничките спецификации на елементите на системот беа внимателно и соодветно одбрани во склад со предложената геометрија на моделот, но за акустична средина со различни физички карактеристики тие веројатно ќе бидат несоодветни. Со развојот на новите сензорски, контролни и процесирачки технологии, изведбата на овие системи наоѓа широки можности за избор на нивните компоненти, не само од аспект на доменот на работа, туку и нивната големина и цена на чинење. Во таа насока, потенцијално ваков систем може да биде реализиран со поинакви харверски компоненти, а со тоа би се постигнало и промена на физичките ограничувања на системот и трошоците за негова изведба.

Кај имплементацијата на предложениот систем за активна контрола на акустична средина се присутни две ограничувања. Првото се однесува на тоа дека системот може да обезбеди контрола на акустичната средина само на познат примарен сигнал кој има облик на чист синусоиден тон. Ова ограничување може да биде надминато со поставување на дополнителен сензор за звук пред самиот примарен извор (систем со директна врска) кој би го детектирал влезниот сигнал и би отворил можност за контрола на поширок спектар на влезни сигнали. Второто ограничување е физичкото ограничување на зоната во која системот може да обезбеди намалување на звукот. Тоа се должи на фактот што интегрираниот сензор за звук може да го детектира звукот само во полето на неговиот мерен ранг, односно во планарната зона на ширење на бранот. Ова ограничување води кон идеја за креирање на систем кој ќе се состои од повеќе мерни сензори за звук просторно распределени, кои ќе можат да обезбедат зголемување на физичките граници на „тивката зона“. Во таа насока, идните истражувања ќе бидат посветени на активната контрола на звукот за обезбедување три-димензионални „тивки зони“, кое денес претставува атрактивно поле на интерес во научните истражувања поврзани со контролата на звукот.

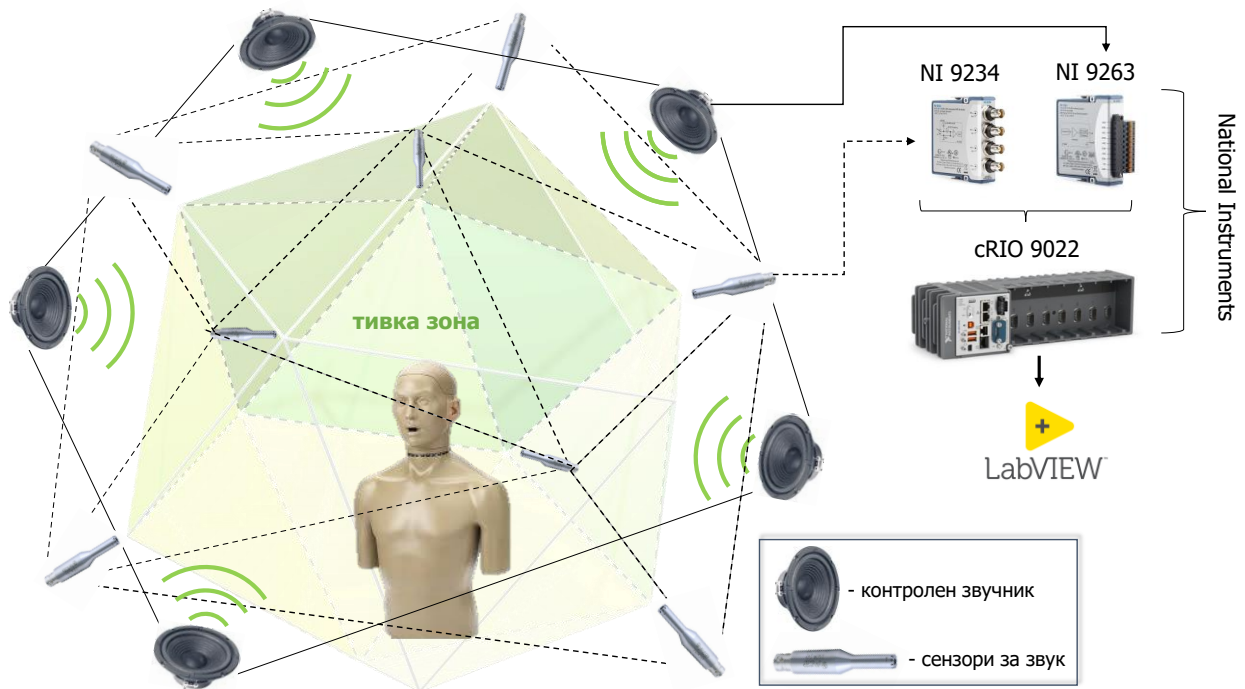
6.2.2. Предлог за развој на концепт на три-димензионални „тивки“ зони

Адаптивните системи за активна контрола на звукот се широко истражувани и се почесто применувани во многу индустриски, но и секојдневни апликации. Сепак, главното ограничување на досега развиените системи е нивната потреба за повратен сигнал од зоната на интерес. Согласно погоре развиената дискусија за технолошките ограничувања во дизајнот, до неодамна активната контрола на звукот беше речиси технички невозможна со користењето на техниките кои се на располагање. Постоечките сензори за звук не можат да го измерат звукот во поголем број на дискретни точки, па како последица на тоа активните системи за контрола не можат да го контролираат звукот во три димензии [189].

Активната контрола на звукот применета во просторно проширен регион е предизвикувачко поле на истражување чија цел е создавање на поширока „тивка зона“ во три-димензионални (3D) простор [190-193]. Во просторните апликации на системите за активна контрола, како што е намалување на звукот во авионските и автомобилските

кабини, имплементирани се повеќеканални системи кои се состојат од со повеќе сензори и повеќе контролни извори на звук. Овие софистицирани решенија ги надминуваат ограничувањата на поедноставните системи за активна контрола опишани погоре, но истовремено овие технологии се исклучително сложени и скапи.

Базирано на сознанијата истакнати во оваа докторска дисертација, како препорака за идна работа се предлага анализа и потенцијална реализација на систем за активна контрола на акустична средина во три-димензионален простор (Слика 6-1). Главната идеја е хардверските компоненти кои се искористени за реализација на експерименталниот модел на активен систем во еднодимензионален простор да бидат применети повторно, со дополнување на бројот на сензорски и контролни единици. Имено, главната компонента во состав на системот може да биде cRIO 9022 реконфигурабилната единица од National Instruments, која претставува FPGA базиран влезно-излезен модул за работа со сигналите во реално време. Слично како и кај системот за активна контрола кој е претставен во оваа докторска дисертација, може да биде искористен дополнителниот модул за аквизиција на аналогни сигнали NI 9234, како и модулот за генерирање на аналогни сигнали NI 9263 кои се додаваат на шасијата на cRIO 9022. Шасијата на cRIO 9022 нуди можност за додавање на 8 вакви модули, што би значело 4 модули за аквизиција и 4 модули за генерирање на аналоген сигнал.



Слика 6-1: Концепт на три-димензионален систем за активна контрола на звук

Следствено, примената на ваквиот систем може да биде проширена до можност за додавање на најмногу 16 сензори за звук и 16 контролни звучници, кое согласно истражувањата е повеќе од доволно за обезбедување на тивка три-димензионална зона

во мал работен простор. Предложениот систем би бил повторно дизајниран во LabView програмската околина, со користење на алатките за дигитално процесирање на сигнали во реално време, каде истовремено се извршува и мониторинг, визуелизација и анализа на сигналите од системот. Контролата на предложениот систем неизбежно ќе биде спроведена со користење на адаптивните алгоритми кои треба да бидат повторно соодветно одбрани, во насока на надоградба на постоечкиот систем кој има веќе покажана функционалност [194].

Дополнително, се препорачува веќе постоечкиот систем да биде надграден во насока на негово оспособување за намалување на широк спектар на звуци, преку интегрирање на референтни сензори за звук кои ќе го детектираат влезниот звучен сигнал. Имајќи го тоа во предвид, ќе бидат неопходни обемни анализи за однесувањето на звукот во овие услови, како и испитување на контролниот дизајн на системот вклучително и на адаптивните алгоритми кои треба да ги задоволат овие услови. Надоградувањето на постоечкиот систем за активна контрола на акустичната средина е предизвикувачка задача од аспект на дизајн на контролниот модел кој треба да управува со множество на звучни сигнали кои се дисперзираат слободно во отворен простор. Истовремено, треба да се внимава на тоа дека контролата на ваков комплексен систем бара и високи процесирачки перформанси и голема пресметковна моќ на компјутерската единица.

Постигнувањето на функционален и лесно применлив систем за активна контрола на три-димензионална акустична средина е голем предизвик и претставува сериозна задача која инкорпорира продлабочено познавање на принципите на акустиката и однесувањето на звукот во отворен простор, како и вештини во дигиталната обработка на сигналите и контролната теорија. Истражувањата во насока на три-димензионалните системи за активна контрола на звукот претставуваат инспирирачка и актуелна област во полето на контрола на звукот. Несомнено, креирањето на „тивки зони“ или „тивки простори“ во секојдневието на луѓето преку примена на не многу скапи, апликативни и едноставни за реализација активни системи за контрола на звукот е повеќе од пожелно и посакувано.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] World Health Organization, 2018. *Environmental noise guidelines for the European region*. World Health Organization. Regional Office for Europe.
- [2] Hansen, C.N., 1999. *Understanding active noise cancellation*. CRC Press.
- [3] Berglund, B., Hassmén, P. and Job, R.S., 1996. Sources and effects of low-frequency noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 99(5), pp.2985-3002.
- [4] Pawlaczyk-Łuszczynska, M., Dudarewicz, A., Waszkowska, M., Szymczak, W. and Śliwińska-Kowalska, M., 2005. The impact of low frequency noise on human mental performance. *Int J Occup Med Environ Health*, 18(2), pp.1981-185.
- [5] Hansen, C.H. and Bies, D.A., 1995. *Engineering noise control*. London: Spon.
- [6] Elliot, S.J. and Nelson, P.A., 1994. Active noise control. *Noise News International*, 2(2), pp.75-98.
- [7] Madahana, M.C., Moroe, N.F. and Nyandoro, O.T., 2020. Engineering noise control for mines: Lessons from the world. *South African Journal of Communication Disorders*, 67(2), pp.1-5.
- [8] Ardekani, I.T. and Abdulla, W.H., 2011. On the convergence of real-time active noise control systems. *Signal Processing*, 91(5), pp.1262-1274.
- [9] Kajikawa, Y., Gan, W.S. and Kuo, S.M., 2012. Recent advances on active noise control: open issues and innovative applications. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 1.
- [10] Lam, B., Gan, W.S., Shi, D., Nishimura, M. and Elliott, S., 2021. Ten questions concerning active noise control in the built environment. *Building and Environment*, 200, p.107928.
- [11] Wise, S. and Leventhall, G., 2010. Active noise control as a solution to low frequency noise problems. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, 29(2), pp.129-137.
- [12] Chang, C.Y., Kuo, S.M. and Huang, C.W., 2018. Secondary path modeling for narrowband active noise control systems. *Applied Acoustics*, 131, pp.154-164.
- [13] Márquez, R.A.M., 2019. *Active noise control in the presence of uncertain and time-varying disturbances* (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).
- [14] Kataja, J., 2012. Development of a robust and computationally-efficient active sound profiling algorithm in a passenger car: Licentiate thesis.
- [15] Yang, F., Cao, Y., Wu, M., Albu, F. and Yang, J., 2018. Frequency-domain filtered-x LMS algorithms for active noise control: A review and new insights. *Applied Sciences*, 8(11), p.2313.

- [16] Dixit, S. and Nagaria, D., 2017. LMS adaptive filters for noise cancellation: A review. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7(5), p.2520.
- [17] Moazzam, M. and Rabbani, M.S., 2014. Performance evaluation of different active noise control (ANC) algorithms for attenuating noise in a duct.
- [18] Vanderkooy, J. and Obasi, E.E., An Improved Acoustic Model for Active Noise Control in a Duct.
- [19] Suman, T. and Venkatanarayana, M., 2021. Active Noise Control for PVC Duct Using Robust Feedback Neutralization FxLMS Approach. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 32(5), pp.1189-1203.
- [20] Kim, H.W., Park, H.S., Lee, S.K. and Shin, K., 2011. Modified-filtered-u LMS algorithm for active noise control and its application to a short acoustic duct. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25(1), pp.475-484.
- [21] Chen, K.C., Chang, C.Y. and Kuo, S.M., 2017, September. Active noise control in a duct to cancel broadband noise. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 237, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
- [22] George, N.V. and Panda, G., 2013. Advances in active noise control: A survey, with emphasis on recent nonlinear techniques. *Signal processing*, 93(2), pp.363-377.
- [23] Landau, I.D., Meléndez, R., Dugard, L. and Buche, G., 2017. Robust and adaptive feedback noise attenuation in ducts. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 27(2), pp.872-879..
- [24] Larsson, M., Johansson, S., Håkansson, L. and Claesson, I., 2008. Performance evaluation of a module configured active silencer for robust active noise control of low frequency noise in ducts.
- [25] Toochinda, V., Hollot, C.V. and Chait, Y., 2001, December. On selecting sensor and actuator locations for anc in ducts. In *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228)* (Vol. 3, pp. 2593-2598). IEEE.
- [26] Sawada, Y. and Ohsumi, A., 2000, June. Active noise control of sound wave in a one-dimensional duct. In *Proceedings of the 2000 American control conference. ACC (IEEE Cat. No. 00CH36334)* (Vol. 5, pp. 3013-3017). IEEE.
- [27] Burián, L. and Fuchs, P., 2005, September. A simple active noise control in acoustic duct. In *Proceedings of the 2005 European Conference on Circuit Theory and Design, 2005.* (Vol. 3, pp. III-265). IEEE.
- [28] Burgess, J.C., 1981. Active adaptive sound control in a duct: A computer simulation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 70(3), pp.715-726.
- [29] Dumitrescu, C.I., Moise, I.M., Soare, B. and Dumitru, N., 2013, October. Adaptive noise cancellation using LabVIEW. In *2013 IEEE 19th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)* (pp. 139-143). IEEE.
- [30] Akhtar, M.T., 2021. Narrowband feedback active noise control systems with secondary path modeling using gain-controlled additive random noise. *Digital Signal Processing*, 111, p.102976.
- [31] Sayed, A.H., 2003. *Fundamentals of adaptive filtering*. John Wiley & Sons.
- [32] Kuo, S.M. and Morgan, D.R., 1996. *Active noise control systems* (Vol. 4). Wiley, New York.
- [33] Furat, M., Advances in Noise Control from Passive to IoT Assisted Active Control.
- [34] Ouis, D., 2001. Annoyance from road traffic noise: a review. *Journal of environmental psychology*, 21(1), pp.101-120.

- [35] González, A.E., 2022. Overview of Noise Control Techniques and Methods.
- [36] Hansen, C.H. and Hansen, K.L., 2021. *Noise control: from concept to application*. CRC Press.
- [37] Crocker, M.J. and Price, A.J., 2018. *Noise and noise control*. Crc Press.
- [38] Bies, D.H., Hansen, C.H. and Campbell, R.H., 1996. Engineering noise control.
- [39] Blauert, J. and Xiang, N., 2009. *Acoustics for engineers: Troy lectures*. Springer-verlag.
- [40] Hegewald, J., Schubert, M., Freiberg, A., Romero Starke, K., Augustin, F., Riedel-Heller, S.G., Zeeb, H. and Seidler, A., 2020. Traffic noise and mental health: a systematic review and meta-analysis. *International journal of environmental research and public health*, 17(17), p.6175.
- [41] ISO 362-1:2015 Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles — Engineering method — Part 1: M and N categories
- [42] Gabbert, U., Duvigneau, F. and Shan, J., 2014, July. Active and passive measures to reduce the noise pollution of combustion engines. In *2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)* (pp. 1072-1077). IEEE.
- [43] Bürgin, T., Bertolini, C., Caprioli, D. and Müller, C., 2014. Engine encapsulation for CO2 and noise reduction. *ATZ worldwide*, 116(3), pp.16-21.
- [44] Di Marco, F., D'Amico, R. and Ronzio, F., 2019, September. Electric motor encapsulation design for improved NVH: A CAE-based approach. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings (Vol. 259, No. 7, pp. 2464-2474). Institute of Noise Control Engineering.
- [45] Broatch, A., Novella, R., Gomez-Soriano, J., Pinaki, P. and Som, S., 2018. Numerical methodology for optimization of compression-ignited engines considering combustion noise control. *SAE International Journal of Engines*, 11(6), pp.625-642.
- [46] Duvigneau, F., Luft, T., Hots, J., Verhey, J.L., Rottengruber, H. and Gabbert, U., 2016. Thermo-acoustic performance of full engine encapsulations—A numerical, experimental and psychoacoustic study. *Applied Acoustics*, 102, pp.79-87.
- [47] Venkatagiri, B.R., Raj, S.K., Kasyap, S., Kumar, V.G., Baalamurugan, J. and Alphonse, M., 2020, December. Latest trends in automotive muffler—A review. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2311, No. 1, p. 040019). AIP Publishing LLC.
- [48] Torregrosa, A.J., Broatch, A., Gil, A. and Gómez-Soriano, J., 2018. Numerical approach for assessing combustion noise in compression-ignited Diesel engines. *Applied Acoustics*, 135, pp.91-100.
- [49] Mahroogi, F.O., Narayan, S. and Gupta, V., 2018. Acoustic transfer function in gasoline engines. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 14(3), pp.270-280.
- [50] Chivate, S., Hujare, P., Askhedkar, R., Hujare, D. and Chinchankar, S., 2022. A review on acoustic performance analysis of reactive muffler. *Materials Today: Proceedings*.
- [51] Damyar, N., Mansouri, F., Khavanin, A., Jafari, A.J., Asilian-Mahabadi, H. and Mirzaei, R., 2022. Acoustical Performance of a Double-Expansion Chamber Muffler: Design and Evaluation. *Health Scope*, 11(1).
- [52] Fu, J., Xu, M., Zhang, Z., Kang, W. and He, Y., 2019. Muffler structure improvement based on acoustic finite element analysis. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 38(2), pp.415-426.
- [53] Del Pizzo, L.G., Bianco, F., Moro, A., Schiaffino, G. and Licitra, G., 2021. Relationship between tyre cavity noise and road surface characteristics on low-noise pavements. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 98, p.102971.
- [54] Benchea, M., Bujoreanu, C. and Ianus, G., 2021, June. Acoustic Performance of Some Lined Dissipative Silencers. In *International Conference Innovation in Engineering* (pp. 302-311). Springer, Cham.

- [55] Arslan, H., Ranjbar, M., Secgin, E. and Celik, V., 2020. Theoretical and experimental investigation of acoustic performance of multi-chamber reactive silencers. *Applied Acoustics*, 157, p.106987.
- [56] Biswas, G.G. and Phate, M.R., Analysis and Modification of Motorbike Silencer Exhaust System for Noise Reduction.
- [57] Tupov, V.V., 2022, April. Calculating intake noise in motorcycle engines. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2383, No. 1, p. 040013). AIP Publishing LLC.
- [58] Dokumacı, E., 2021. *Duct Acoustics: Fundamentals and Applications to Mufflers and Silencers*. Cambridge University Press.
- [59] Bezemer-Krijnen, M. and De Boer, A., 2016, August. Tyre-road noise measurements: influence of tyre tread and road characteristics. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 253, No. 2, pp. 6064-6075). Institute of Noise Control Engineering.
- [60] Wehr, R., Fuchs, A. and Aichinger, C., 2018. A combined approach for correcting tyre hardness and temperature influence on tyre/road noise. *Applied Acoustics*, 134, pp.110-118.
- [61] Vieira, T., Lundberg, J. and Eriksson, O., 2020. Evaluation of uncertainty on Shore hardness measurements of tyre treads and implications to tyre/road noise measurements with the Close Proximity method. *Measurement*, 162, p.107882.
- [62] Del Pizzo, L.G., Teti, L., Moro, A., Bianco, F., Fredianelli, L. and Licitra, G., 2020. Influence of texture on tyre road noise spectra in rubberized pavements. *Applied Acoustics*, 159, p.107080.
- [63] FREITAS, E.F., Tinoco, J., Soares, F., Costa, J., Cortez, P. and Pereira, P., 2015. Modelling tyre-road noise with data mining techniques. *Archives of Acoustics*, 40(4), pp.547-560.
- [64] Lee, T., Nomura, T., Dede, E.M. and Iizuka, H., 2020. Asymmetric loss-induced perfect sound absorption in duct silencers. *Applied Physics Letters*, 116(21), p.214101.
- [65] Oltean-Dumbrava, C. and Miah, A., 2016. Assessment and relative sustainability of common types of roadside noise barriers. *Journal of Cleaner Production*, 135, pp.919-931.
- [66] Lacasta, A.M., Penaranda, A., Cantalapiedra, I.R., Auguet, C., Bures, S. and Urrestarazu, M., 2016. Acoustic evaluation of modular greenery noise barriers. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, pp.172-179.
- [67] Clairbois, J.P. and Garai, M., 2015. The European standards for roads and railways noise barriers: state of the art 2015. In *Proceedings of the 10th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering: EuroNoise* (pp. 45-50).
- [68] Martinez-Orozco, J.M. and Barba, A., 2022. Determination of Insertion Loss of noise barriers in Spanish roads. *Applied Acoustics*, 186, p.108435.
- [69] Wang, H., Luo, P. and Cai, M., 2018. Calculation of noise barrier insertion loss based on varied vehicle frequencies. *Applied Sciences*, 8(1), p.100.
- [70] Papadakis, N.M. and Stavroulakis, G.E., 2020. Finite element method for the estimation of insertion loss of noise barriers: comparison with various formulae (2D). *Urban Science*, 4(4), p.77.
- [71] Grahm, P. and Jensen, M.H., 2019. OPTIMIZING NOISE BARRIERS WITH COMSOL MULTIPHYSICS.
- [72] Toledo, R., Aznárez, J.J., Greiner, D. and Maeso, O., 2017. A methodology for the multi-objective shape optimization of thin noise barriers. *Applied Mathematical Modelling*, 50, pp.656-675.
- [73] Von Maubeuge, K., Egloffstein, T. and Vollmert, L., 2016. Road noise barriers as longitudinal waste deposits-lined slopes with geosynthetics protecting the environment. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(69), pp.2347-2351.
- [74] Berbic, N., Brigic, A. and SOFTIÆ, A., 2008. Analyze and possibility of soil embankment and forest belt application as a noise barrier at open pit mine. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 24(3), p.1.
- [75] Zhongming, Z., Linong, L., Xiaona, Y., Wangqiang, Z. and Wei, L., 2018. New greener and more efficient noise barriers.

- [76] Ow, L.F. and Ghosh, S., 2017. Urban cities and road traffic noise: Reduction through vegetation. *Applied Acoustics*, 120, pp.15-20.
- [77] Wong, N.H., Tan, A.Y.K., Tan, P.Y., Chiang, K. and Wong, N.C., 2010. Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and environment*, 45(2), pp.411-420.
- [78] Morandi, F., Miniaci, M., Marzani, A., Barbaresi, L. and Garai, M., 2016. Standardised acoustic characterisation of sonic crystals noise barriers: Sound insulation and reflection properties. *Applied Acoustics*, 114, pp.294-306.
- [79] Gieva, E., Ruskova, I., Nedelchev, K. and Kralov, I., 2020, December. Comparative analysis of the acoustic efficiency of classical and sonic crystal noise barriers. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1002, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
- [80] Peiró-Torres, M.D.P., Redondo, J., Bravo, J.M. and Pérez, J.S., 2016. Open noise barriers based on sonic crystals. Advances in noise control in transport infrastructures. *Transportation research procedia*, 18, pp.392-398.
- [81] Rindel, J.H., 2017. *Sound insulation in buildings*. CRC Press.
- [82] Scrosati, C., Scamoni, F., Depalma, M. and Ghellere, M., 2019. *Facade Sound Insulation as Protection to Outdoor Noise*. Universitätsbibliothek der RWTH Aachen.
- [83] Grabarczyk, E.E. and Gill, S.A., 2020. Anthropogenic noise masking diminishes house wren (*Troglodytes aedon*) song transmission in urban natural areas. *Bioacoustics*, 29(5), pp.518-532.
- [84] Elliot, S.J. and Nelson, P.A., 1994. Active noise control. *Noise News International*, 2(2), pp.75-98.
- [85] Wise, S. and Leventhall, G., 2010. Active noise control as a solution to low frequency noise problems. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, 29(2), pp.129-137.
- [86] Boyle, M.D., Soneja, S., Quirós-Alcalá, L., Dalemarre, L., Sapkota, A.R., Sangaramoorthy, T., Wilson, S., Milton, D. and Sapkota, A., 2017. A pilot study to assess residential noise exposure near natural gas compressor stations. *PLoS One*, 12(4), p.e0174310.
- [87] Lu, L., Yin, K.L., de Lamare, R.C., Zheng, Z., Yu, Y., Yang, X. and Chen, B., 2021. A survey on active noise control in the past decade—Part II: Nonlinear systems. *Signal Processing*, 181, p.107929.
- [88] Ardekani, I.T., Kaipio, J.P., Nasiri, A., Sharifzadeh, H. and Abdulla, W.H., 2015. A statistical inverse problem approach to online secondary path modeling in active noise control. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 24(1), pp.54-64.
- [89] Murao, T., Shi, C., Gan, W.S. and Nishimura, M., 2017. Mixed-error approach for multi-channel active noise control of open windows. *Applied Acoustics*, 127, pp.305-315.
- [90] George, N.V. and Panda, G., 2013. Advances in active noise control: A survey, with emphasis on recent nonlinear techniques. *Signal processing*, 93(2), pp.363-377.
- [91] Akhtar, M.T., 2021. Narrowband feedback active noise control systems with secondary path modeling using gain-controlled additive random noise. *Digital Signal Processing*, 111, p.102976.
- [92] Kajikawa, Y., Gan, W.S. and Kuo, S.M., 2012. Recent advances on active noise control: open issues and innovative applications. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 1.
- [93] Lam, B., Gan, W.S., Shi, D., Nishimura, M. and Elliott, S., 2021. Ten questions concerning active noise control in the built environment. *Building and Environment*, 200, p.107928.
- [94] Moazzam, M. and Rabbani, M.S., 2014. Performance evaluation of different active noise control (ANC) algorithms for attenuating noise in a duct.
- [95] Yang, F., Cao, Y., Wu, M., Albu, F. and Yang, J., 2018. Frequency-domain filtered-x LMS algorithms for active noise control: A review and new insights. *Applied Sciences*, 8(11), p.2313.
- [96] Lu, L., Yin, K.L., de Lamare, R.C., Zheng, Z., Yu, Y., Yang, X. and Chen, B., 2021. A survey on active noise control in the past decade—Part II: Nonlinear systems. *Signal Processing*, 181, p.107929.

- [97] Kuo, S.M. and Morgan, D.R., 1999. Active noise control: a tutorial review. *Proceedings of the IEEE*, 87(6), pp.943-973.
- [98] Chen, K.C., Chang, C.Y. and Kuo, S.M., 2017, September. Active noise control in a duct to cancel broadband noise. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 237, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.
- [99] Chang, C.Y., Kuo, S.M. and Huang, C.W., 2018. Secondary path modeling for narrowband active noise control systems. *Applied Acoustics*, 131, pp.154-164.
- [100] Wu, L., Qiu, X. and Guo, Y., 2014. A simplified adaptive feedback active noise control system. *Applied Acoustics*, 81, pp.40-46.
- [101] Luo, L., Sun, J. and Huang, B., 2017. A novel feedback active noise control for broadband chaotic noise and random noise. *Applied Acoustics*, 116, pp.229-237.
- [102] Wu, L., Qiu, X. and Guo, Y., 2018. A generalized leaky FxLMS algorithm for tuning the waterbed effect of feedback active noise control systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 106, pp.13-23.
- [103] Márquez, R.A.M., 2019. *Active noise control in the presence of uncertain and time-varying disturbances* (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).
- [104] Aslam, M.S. and Raja, M.A.Z., 2015. A new adaptive strategy to improve online secondary path modeling in active noise control systems using fractional signal processing approach. *Signal Processing*, 107, pp.433-443.
- [105] Cuesta, E., Kirane, M. and Malik, S.A., 2012. Image structure preserving denoising using generalized fractional time integrals. *Signal Processing*, 92(2), pp.553-563.
- [106] Tseng, C.C. and Lee, S.L., 2012. Design of adjustable fractional order differentiator using expansion of ideal frequency response. *Signal Processing*, 92(2), pp.498-508.
- [107] Kuo, S.M. and Ji, M., 1996. Passband disturbance reduction in periodic active noise control systems. *IEEE transactions on speech and audio processing*, 4(2), pp.96-103.
- [108] Aslam, M.S. and Raja, M.A.Z., 2015. A new adaptive strategy to improve online secondary path modeling in active noise control systems using fractional signal processing approach. *Signal Processing*, 107, pp.433-443.
- [109] Ahmed, S., Akhtar, M.T. and Zhang, X., 2012. Robust auxiliary-noise-power scheduling in active noise control systems with online secondary path modeling. *IEEE transactions on audio, speech, and language processing*, 21(4), pp.749-761.
- [110] Wang, J. and Huang, L., 2006. Active control of drag noise from a small axial flow fan. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(1), pp.192-203.
- [111] Aslam, M.S. and Raja, M.A.Z., 2015. A new adaptive strategy to improve online secondary path modeling in active noise control systems using fractional signal processing approach. *Signal Processing*, 107, pp.433-443.
- [112] Chang, C.Y., Kuo, S.M. and Huang, C.W., 2018. Secondary path modeling for narrowband active noise control systems. *Applied Acoustics*, 131, pp.154-164.
- [113] Tsuei, T.G., Srinivasa, A. and Kuo, S.M., 2000, September. An adaptive feedback active noise control system. In *Proceedings of the 2000. IEEE International Conference on Control Applications. Conference Proceedings (Cat. No. 00CH37162)* (pp. 249-254). IEEE.
- [114] Luo, L., Sun, J. and Huang, B., 2017. A novel feedback active noise control for broadband chaotic noise and random noise. *Applied Acoustics*, 116, pp.229-237.
- [115] Wu, L., Qiu, X. and Guo, Y., 2018. A generalized leaky FxLMS algorithm for tuning the waterbed effect of feedback active noise control systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 106, pp.13-23.

- [116] Akhtar, M.T. and Mitsuhashi, W., 2011. Improving performance of hybrid active noise control systems for uncorrelated narrowband disturbances. *IEEE transactions on audio, speech, and language processing*, 19(7), pp.2058-2066.
- [117] Wu, L., Qiu, X., Burnett, I.S. and Guo, Y., 2015. Decoupling feedforward and feedback structures in hybrid active noise control systems for uncorrelated narrowband disturbances. *Journal of Sound and Vibration*, 350, pp.1-10.
- [118] Milani, A.A., Kannan, G. and Panahi, I.M., 2010, March. On maximum achievable noise reduction in ANC systems. In *2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (pp. 349-352). IEEE.
- [119] Jiang, Y., Chen, S., Meng, H., Zhou, Z. and Lv, W., 2021. A novel adaptive step-size hybrid active noise control system. *Applied Acoustics*, 182, p.108285.
- [120] Wang, T., Gan, W.S. and Chong, Y.K., 2012, March. Psychoacoustic hybrid active noise control system. In *2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 321-324). IEEE.
- [121] Padhi, T., Chandra, M., Kar, A. and Swamy, M.N.S., 2017. Design and analysis of an improved hybrid active noise control system. *Applied Acoustics*, 127, pp.260-269.
- [122] Albu, F., Gully, A. and De Lamare, R., 2014, December. Sparsity-aware pseudo affine projection algorithm for active noise control. In *Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), 2014 Asia-Pacific* (pp. 1-5). IEEE.
- [123] Ferrer, M., Gonzalez, A., de Diego, M. and Pinero, G., 2012. Convex combination filtered-x algorithms for active noise control systems. *IEEE Transactions on audio, speech, and language processing*, 21(1), pp.156-167.
- [124] George, N.V. and Gonzalez, A., 2014. Convex combination of nonlinear adaptive filters for active noise control. *Applied Acoustics*, 76, pp.157-161.
- [125] Milani, A.A., Kannan, G. and Panahi, I.M., 2010, March. On maximum achievable noise reduction in ANC systems. In *2010 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (pp. 349-352). IEEE.
- [126] Lu, L., Yin, K.L., de Lamare, R.C., Zheng, Z., Yu, Y., Yang, X. and Chen, B., 2021. A survey on active noise control in the past decade—Part I: Linear systems. *Signal Processing*, 183, p.108039.
- [127] Zhang, Y., Wen, J. and Han, Y., 2018, March. Adaptive learning based active noise cancellation. In *Proceedings of the 3rd international conference on multimedia and image processing* (pp. 41-45).
- [128] Lau, Y.S., Hussian, Z.M. and Harris, R., 2003, December. Performance of adaptive filtering algorithms: A comparative study. In *Australian Telecommunications Networks and Applications Conference* (pp. 1-4).
- [129] Zhou, P., Xu, G., Guo, X.D. and Lin, Y.S., 2013. Design and Research of Adaptive Filter Based on LabVIEW. *Sensors & Transducers*, 158(11), p.363.
- [130] Dumitrescu, C.I., Moise, I.M., Soare, B. and Dumitru, N., 2013, October. Adaptive noise cancellation using LabVIEW. In *2013 IEEE 19th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)* (pp. 139-143). IEEE.
- [131] Szopos, E. and Hedesiu, H., 2009. LabVIEW FPGA based noise cancelling using the LMS adaptive algorithm. *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS Electronics and Telecommunications*, 50(4), pp.5-8.
- [132] Sharma, D., Kaur, R. and Singh, G., 2015. A Comparative Analysis of Adaptive IIR Filtering Techniques using LabVIEW. *Int. J. Hyb. Info. Tech*, 8, pp.289-302.

- [133] Martinek, R., Kahankova, R., Bilik, P., Nedoma, J., Fajkus, M. and Skacel, M., 2018, January. Speech signal processing using microphones NI 9234 and LabVIEW. In *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Modeling and Simulation* (pp. 9-13).
- [134] Coandă, P., Avram, M. and Comeagă, D., 2020, December. A hands-on approach to demonstrating active noise cancelling. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 997, No. 1, p. 012040). IOP Publishing.
- [135] Dixit, S. and Nagaria, D., 2017. LMS adaptive filters for noise cancellation: A review. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7(5), p.2520.
- [136] Kehtarnavaz, N. and Gope, C., 2006, May. DSP system design using LabVIEW and Simulink: a comparative evaluation. In *2006 IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings* (Vol. 2, pp. II-II). IEEE.
- [137] Munir, M.W., Abdulla, W., Ardekani, I. and Patel, N., 2017, November. Physical classification and recent developments of active noise control systems. In *Proceedings of the 9th International Conference on Signal Processing Systems* (pp. 180-187).
- [138] Samarasinghe, P.N., Zhang, W. and Abhayapala, T.D., 2016. Recent advances in active noise control inside automobile cabins: Toward quieter cars. *IEEE Signal Processing Magazine*, 33(6), pp.61-73.
- [139] Jiang, J. and Li, Y., 2018. Review of active noise control techniques with emphasis on sound quality enhancement. *Applied Acoustics*, 136, pp.139-148.
- [140] Gabbert, U., Duvigneau, F. and Ringwelski, S., 2017. Noise control of vehicle drive systems. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*, 15(2), pp.183-200.
- [141] Jung, W., Elliott, S.J. and Cheer, J., 2019. Local active control of road noise inside a vehicle. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 121, pp.144-157.
- [142] Kataja, J., 2012. Development of a robust and computationally-efficient active sound profiling algorithm in a passenger car: Licentiate thesis.
- [143] Polivaev, O.I., Kuznetsov, A.N., Larionov, A.N. and Beliansky, R.G., 2018, March. Reduction of external noise of mobile energy facilities by using active noise control system in muffler. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 327, No. 4, p. 042082). IOP Publishing.
- [144] Gabbert, U., Duvigneau, F. and Ringwelski, S., 2017. Noise control of vehicle drive systems. *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*, 15(2), pp.183-200.
- [145] Zhao, S., Qiu, X., Lacey, J. and Maisch, S., 2019. Configuring fixed-coefficient active control systems for traffic noise reduction. *Building and Environment*, 149, pp.415-427.
- [146] Lee, H.M., Hua, Y., Wang, Z., Lim, K.M. and Lee, H.P., 2021. A review of the application of active noise control technologies on windows: Challenges and limitations. *Applied Acoustics*, 174, p.107753.
- [147] Lam, B., Shi, D., Gan, W.S., Elliott, S.J. and Nishimura, M., 2020. Active control of broadband sound through the open aperture of a full-sized domestic window. *Scientific reports*, 10(1), pp.1-7.
- [148] Furat, M., Advances in Noise Control from Passive to IoT Assisted Active Control.
- [149] Nyarubeli, I.P., Tungu, A.M., Bråtveit, M., Sunde, E., Kayumba, A.V. and Moen, B.E., 2018. Variability and determinants of occupational noise exposure among iron and steel factory workers in Tanzania. *Annals of work exposures and health*, 62(9), pp.1109-1122.
- [150] Noweir, M.H., Bafail, A.O. and Jomoah, I.M., 2014. Noise pollution in metalwork and woodwork industries in the Kingdom of Saudi Arabia. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 20(4), pp.661-670.
- [151] Patel, V. and Cheer, J., 2022. A hybrid multi-reference subband control strategy for active noise control headphones. *Applied Acoustics*, 197, p.108932.

- [152] Alexandre, L., Lecomte, P., Galland, M.A. and Popoff, M., 2022, June. Feedback Acoustic Noise Control with Faust on FPGA: Application to Noise Reduction in Headphones. In *International Faust Conference*.
- [153] Cheer, J. and Elliott, S.J., 2016. Active noise control of a diesel generator in a luxury yacht. *Applied Acoustics*, 105, pp.209-214.
- [154] EC (European Commission), 2002 Directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise Offic J Euro Commun L, 189 (2002), pp. 12-26 (Brussels, Belgium: European Commission) [Google Scholar](#)
- [155] Kliučininkas, L. and Šaliūnas, D., 2006. Noise mapping for the management of urban traffic flows. *Mechanics*, 59(3), pp.61-66.
- [156] Popescu, D.I., Tuns, R.E. and Moholea, I.F., 2011. The Urban Acoustic Environment—A Survey for Road Traffic Noise. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 6(1), pp.285-292.
- [157] Leduc, G., 2008. Road traffic data: Collection methods and applications. *Working Papers on Energy, Transport and Climate Change*, 1(55), pp.1-55.
- [158] [ISO 1996-1, 2003](#) ISO 1996-1. Acoustics-Description, Measurement and Assessment of Environmental Noise. Part 1: Basis Quantities and Assessment Procedures International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland (2003)
- [159] Farcaş, F. and Sivertunb, Å., 2010. Road traffic noise: GIS tools for noise mapping and a case study for Skåne region. *Sweden: Citeseer*.
- [160] Licitra, G. and Ascari, E., 2012. The Good Practice Guide, Version 2. *Noise Mapping in the EU: Models and Procedures*, p.159.
- [161] Coelho, J.B. and Alarcao, D., 2006. Noise mapping and noise action plans in large urban areas. *Technical Acoustica*, pp.1039-1044.
- [162] Barba, A. and Martinez-Orozco, J.M., 2022. Approaches for Noise Barrier Effectiveness Evaluation based on In Situ “Insertion Loss” Determination.
- [163] Fan, X., Li, L., Zhao, L., He, H., Zhang, D., Ren, Z. and Zhang, Y., 2020. Environmental noise pollution control of substation by passive vibration and acoustic reduction strategies. *Applied Acoustics*, 165, p.107305.
- [164] Nilsson, M.E., Kaczmarek, T. and Berglund, B., 2004, August. Perceived soundscape evaluation of noise mitigation methods. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 2004, No. 5, pp. 2683-2688). Institute of Noise Control Engineering.
- [165] young Hong, J., Jang, H.S. and yong Jeon, J., 2012, April. Evaluation of noise barriers for soundscape perception through laboratory experiments. In *Acoustics 2012*.
- [166] Li, Q., Duhamel, D., Luo, Y. and Yin, H., 2020. Analysing the acoustic performance of a nearly-enclosed noise barrier using scale model experiments and a 2.5-D BEM approach. *Applied Acoustics*, 158, p.107079.
- [167] Kotzen, B. and English, C., 2014. *Environmental noise barriers: a guide to their acoustic and visual design*. CRC Press.
- [168] Zhang, X., Liu, R., Cao, Z., Wang, X. and Li, X., 2019. Acoustic performance of a semi-closed noise barrier installed on a high-speed railway bridge: measurement and analysis considering actual service conditions. *Measurement*, 138, pp.386-399.

- [169] Gezork, T. and Petrie-Repar, P., 2020. Influence of gap detailing on calculated unsteady non-adjacent blade row aero-forcing in a transonic compressor stage. *Journal of Turbomachinery*, 142(11).
- [170] Kreuzer, W., 2022. Numerical simulation of sound propagation in and around ducts using thin boundary elements. *Journal of Sound and Vibration*, p.117050.
- [171] Piana, E.A., Carlsson, U.E., Lezzi, A.M., Paderno, D. and Boij, S., 2022. Silencer Design for the Control of Low Frequency Noise in Ventilation Ducts. *Designs*, 6(2), p.37.
- [172] Dey, N., Ashour, A.S., Mohamed, W.S. and Nguyen, N.G., 2019. Acoustic wave technology. In *Acoustic sensors for biomedical applications* (pp. 21-31). Springer, Cham.
- [173] Xiang, N. and Blauert, J., 2021. *Acoustics for Engineers*. Springer, Berlin.
- [174] Fava, T.C. and Cavalieri, A.V., 2019. Propagation of acoustic waves in ducts with axially-varying parameters using the parabolized stability equations. In *25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (p. 2447).
- [175] Hamza, A.R. and Shiekh, M.A.H., 2022. Active Noise Cancellation: A New Horizon for Better Life. *Journal of Kurdistan for Strategic Studies*, (1).
- [176] Nishikawa, K., 2019, May. Low variance adaptation method for the LMS-type adaptive filters based on the gaussian model. In *2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)* (pp. 1-5). IEEE.
- [177] Shi, L., Zhao, H., Wang, W. and Lu, L., 2019. Combined regularization parameter for normalized LMS algorithm and its performance analysis. *Signal Processing*, 162, pp.75-82.
- [178] Clarkson, P.M., 2017. *Optimal and adaptive signal processing*. Routledge.
- [179] Kajikawa, Y., Gan, W.S. and Kuo, S.M., 2012. Recent advances on active noise control: open issues and innovative applications. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 1.
- [180] Aslam, M.S. and Raja, M.A.Z., 2015. A new adaptive strategy to improve online secondary path modeling in active noise control systems using fractional signal processing approach. *Signal Processing*, 107, pp.433-443.
- [181] Chen, K.T. and Liu, Y.H., 2000. A physical insight of the active control on sound source in a pipe. *Applied Acoustics*, 61(2), pp.133-148.
- [182] Peña, R.S., Cugueró, M.A., Masip, A., Quevedo, J. and Puig, V., 2008. Robust identification and feedback design: An active noise control case study. *Control Engineering Practice*, 16(11), pp.1265-1274.
- [183] Airimitoiaie, T.B., Landau, I.D., Melendez, R. and Dugard, L., 2020. Algorithms for Adaptive Feedforward Noise Attenuation—A Unified Approach and Experimental Evaluation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 29(5), pp.1850-1862.
- [184] Goel, P. and Chandra, M., 2019. FPGA Implementation of Adaptive Filtering Algorithms for Noise Cancellation—A Technical Survey. In *Proceedings of the Third International Conference on Microelectronics, Computing and Communication Systems* (pp. 517-526). Springer, Singapore.
- [185] Luo, L., Sun, J. and Huang, B., 2017. A novel feedback active noise control for broadband chaotic noise and random noise. *Applied Acoustics*, 116, pp.229-237.
- [186] Krishna, A., Ravinchandra, L., Fei, T.K. and Yong, L.C., 2019, May. Active noise reduction using LMS and FxLMS algorithms. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1228, No. 1, p. 012064). IOP Publishing.

- [187] Wang, T. and Gan, W.S., 2014. Stochastic analysis of FXLMS-based internal model control feedback active noise control systems. *Signal Processing*, 101, pp.121-133.
- [188] Bitter, R., Mohiuddin, T. and Nawrocki, M., 2017. *LabVIEW™ Advanced Programming Techniques*. CRC press.
- [189] Zhang, J., Sun, H., Samarasinghe, P.N. and Abhayapala, T.D., 2020, May. Active noise control over multiple regions: Performance analysis. In *ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 8409-8413). IEEE.
- [190] Dühning, M.B., Jensen, J.S. and Sigmund, O., 2008. Acoustic design by topology optimization. *Journal of sound and vibration*, 317(3-5), pp.557-575.
- [191] Sun, H., Zhang, J., Abhayapala, T.D. and Samarasinghe, P.N., 2021, October. Active noise control over 3d space with remote microphone technique in the wave domain. In *2021 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA)* (pp. 301-305). IEEE.
- [192] Aslan, F. and Paurobally, R., 2018. Modelling and simulation of active noise control in a small room. *Journal of Vibration and Control*, 24(3), pp.607-618.
- [193] Ito, H., Koyama, S., Ueno, N. and Saruwatari, H., 2020, May. Spatial active noise control based on kernel interpolation with directional weighting. In *ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 8404-8408). IEEE.
- [194] Ardekani, I.T. and Abdulla, W.H., 2014. Active noise control in three dimensions. *IEEE Transactions on control systems technology*, 22(6), pp.2150-2159.