TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

AKTIIV-MÜRASUMMUTUSTEHNOLOOGIA RAKENDAMINE TORUDES

THE IMPLEMENTATION OF ACTIVE NOISE CANCELLING TECHNOLGY IN DUCTS

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Peeter Hansen

Üliõpilaskood: 185478EAAB

Juhendaja: Martin Jaanus, vanemlektor

Tallinn 2022

(Tiitellehe pöördel)

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.
Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.
Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." ..... 2022.

Autor: .....
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 2022.

Juhendaja: .....
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."..... 2022 .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....
/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks[1]

Mina Peeter Hansen

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Aktiiv-mürasummutustehnoloogia rakendamine torudes"

mille juhendaja on Martin Jaanus,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18.05.2022 (*kuupäev*)

---

[1] *Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.*

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Peeter Hansen *Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Aktiiv-mürasummutustehnoloogia rakendamine torudes

Kuupäev: 18.05.2022 58 *lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)*

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: vanemlektor Martin Jaanus

Töö konsultant: Professor Jüri Lavrentjev

Sisu kirjeldus:

Mürareostus on saamas linnastunud maailmas üha suuremaks probleemiks. Seetõttu on oluline kaaluda alternatiivseid meetodeid müra vähendamiseks. Üheks selliseks võimaluseks on aktiiv-mürasummutustehnoloogia kasutamine.

Antud töö käigus konstrueeriti aktiiv-mürasummutustehnoloogial põhinev süsteem, mida rakendati toru mudelil. Selleks valiti välja vajalikud ja sobivad komponendid ning töötati välja metoodika. Läbi viidi mitmed katsed, mille käigus prooviti summutada nii puhtaid siinustoone, erinevaid müraallikaid, kui ka muusikat. Tulemused salvestati analüüsiti hiljem helitöötlusprogrammis Audacity. Katsetega selgitati välja helitugevuse langus aktiiv-mürasummutuse rakendamisel iga testitava helisignaali korral.

Märksõnad: aktiiv-mürasummutus, akustika, heli, valjuhääldi, mikrofon, Audacity, salvestamine, spekter, detsibell

ABSTRACT

Author: Peeter Hansen *Type of the work:* Bachelor Thesis

Title: The implementation of active noise cancelling technology in ducts

Date: 18.05.2022 58 *pages (the number of thesis pages including appendices)*

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: lector Martin Jaanus

Consultant: Associate Professor Jüri Lavrentjev

Abstract:

In the urbanized world, noise pollution is becoming a problem. In order to decrease noise levels alternative methods have to be considered. One possible option is to implement active noise cancelling technology.

In this thesis an active noise cancelling system was constructed and implemented on ducts. Required and suitable components were chosen, and methodology was developed. Many experiments were carried out in order to attempt noise level reduction of signals including sine waves, industrial noise sources and music. The results were recorded and later analysed in audio software Audacity. Noise reduction level of each signal using active noise cancellation were found.

Keywords: active noise cancelling, acoustics, sound, speaker, microphone, Audacity, recording, spectrum, decibel

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Aktiiv-mürasummutustehnoloogia rakendamine torudes
Lõputöö teema inglise keeles:	The implementation of active noise cancelling technology in ducts
Üliõpilane:	**Peeter Hansen, 185478**
Eriala:	**Mehhatroonika EAAB**
Lõputöö liik:	**bakalaureusetöö**
Lõputöö juhendaja:	**Martin Jaanus**
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõte, amet ja kontakt)	**Jüri Lavrentjev**
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	**1 aasta**
Lõputöö esitamise tähtaeg:	**18.05.2022**

_____	_____	_____
Üliõpilane (allkiri)	Juhendaja (allkiri)	Õppekava juht (allkiri)

_____
Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Müra on urbaniseerunud maailma üheks suurimaks stressiallikaks, sest on teada, et pidev müra on otseselt seotud mitmete terviseriskidega.

Antud töös soovin lähemalt uurida, kas aktiiv-mürasummutusel on potentsiaali kasutamiseks ka suuremal skaalal. Töö katseline osa käsitleb endas tehnoloogia rakendamist silindrilises ruumis ehk torus. Ruumi valik on meelevaldne ent siiski hoolikalt kaalutud. Näiteks kasutatakse torul põhinevaid süsteeme ventilatsioonides, auto summutites, korstnates jne.

Kuigi kõnealune tehnoloogia on eksisteerinud juba aastakümneid, on selle kasutamine muutunud populaarsemaks just viimase 10 aasta jooksul, põhiliselt just kõrvaklappide turul. Teisalt pole antud teemat minu hinnangul Eestis piisavalt käsitletud. Puudub vastav eestikeelne kirjandus ning käsitlemine varasemalt valminud lõputöödes on olnud harv.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on konstrueerida aktiiv-mürasummutustehnoloogial põhinev süsteem ning rakendada seda toru mudelil.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

1. Kui suurt helitaseme langust on võimalik aktiiv-mürasummutuse kasutamisel saavutada?
2. Kuidas tekitada vastandfaasis helilainet?
3. Millised on aktiiv-mürasummutuse kasutamise piirangud (ruumi osas, sagedusvahemikud)?
4. Kas aktiiv-mürasummutuse kasutamisel on võimalik lisaks kitsa spektriga mürale välja filtreerida ka kompleksemad helid nagu näiteks kõne, muusika jms?

4. Lähteandmed

Lähteandmed saadakse katse käigus.

5. Uurimismeetodid

Metoodika põhineb erinevatel võimalustel destruktiivse interferentsi tekitamiseks.

6. Graafiline osa

Töö sisaldab skeeme, graafikuid ja tabelid.

7. Töö struktuur

1. Sissejuhatus
2. Akustika parameetrid
3. Mürasummutus
    3.1. Vajadus
    3.2. Passiiv mürasummutus
    3.3. Aktiiv mürasummutus
        3.3.1. Tehnoloogia
        3.3.2. Kasutusalad
4. Katseline osa
    4.1. Katseseadeldise ehitamine
    4.2. Algoritmi koostamine
    4.3. Katse läbiviimine
    4.4. Katseandmete töötlus
    4.5. Soovitused ja järeldused
5. Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Kirjandusallikatena kasutan põhiliselt varasemalt avaldatud ja internetis kättesaadavaid teemapõhiseid teadusartikleid. Samuti ka TTÜ raamatukogus olemasolevaid akustikateemalisi eesti- ja inglise keelset kirjandust.

9. Lõputöö konsultandid

Professor Jüri Lavrentjev andnud nõusoleku abistada töö katselise osaga.

10. Töö etapid ja ajakava

Nr.	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Materjali otsimine, kirjanduse läbitöötamine	20.01.2022
2.	Teoreetilise osa kirjutamine	02.03.2022
3.	Metoodika väljatöötamine	11.03.2022
4.	Katseseadme valmis ehitamine	21.04.2022
5.	Katsete läbiviimine	05.05.2022
6.	Katseandmete töötlus, järeldused	11.05.2022
7.	Lõputöö vormistamine	16.05.2022
8.	Lõputöö juhendajale saatmine	17.05.2022
9.	Lõputöö esitamine	18.05.2022
10.	Lõputöö kaitsmine	09.06.2022

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE 4
ABSTRACT 5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE 6
EESSÕNA 11
Lühendite ja tähiste loetelu 12
SISSEJUHATUS 13
1. AKUSTILISED PARAMEETRID 15
2. VALJUHÄÄLDI JA MIKROFONI TÖÖPÕHIMÕTE 17
3. MÜRASUMMUTUS 19
3.1. Vajadus 19
3.2. Passiiv mürasummutus 21
3.3. Aktiiv-mürasummutus 22
3.3.1. Tehnoloogia 22
3.3.2. Kasutusalad 24
4. KATSESEADELDISE KONSTRUEERIMINE 26
4.1 Seadmete valiku põhjendus 33
4.2 Katseplaan 41
4.3 Katse läbiviimine 43
4.4 Katseandmete töötlus 45
4.4.1 Katse 1. Siinustoonid 46
4.4.2 Katse 2. Tehislik müra 48
4.4.3. Katse 3. Muusika 50
4.4.4 Katse 4. Kahe valjuhääldi vaheline kaugus 51
4.4.5. Katse 5. Passiivne mürasummutus 51
4.5 Soovitused ja järeldused 52
KOKKUVÕTE 53
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU 54
LISAD 56

EESSÕNA

Lõputöö teema valikul lähtusin isiklikust huvist akustika valdkonna vastu. Inspiratsiooni sain 2021 aasta sügisel TalTechis toimunud akustikakonverentsilt, kus kuulsin kõnelemas professor Jüri Lavrentjevit, kes on ka käesoleva töö kaasjuhendaja. Samuti on audio valdkonnaga rohkem kokku puutunud instituudipoolne juhendaja Martin Jaanus. Seetõttu tundus koostöö nendega intrigeeriva võimalusena end arendada.

Tahan tänada mõlemat juhendajat nende poolse panuse eest töö valmimisel.

Lühendite ja tähiste loetelu

ANC – (Active Noise Cancelling) Aktiiv-mürasummutus
dB – detsibell, helitugevuse mõõtühik
delay – ajaline hilistumine, viivitus
latency – viiteaeg (signaalide konverteerimiseks)
p – helirõhk [Pa]
RMS – (root mean square) – arvude ruutkeskmine väärtus ehk efektiivväärtus. Ruutjuur arvude ruutude aritmeetilisest keskmisest.
sämpel – (heli)näidis
track – salvestatud „helijälg" ehk audiosignaali graafiline kujutis, helirada

SISSEJUHATUS

Ümbritsevas maailmas on üha enam infot, signaale ja paratamatult ka müra. Selleks, et digiajastul mitte pead kaotada, tuleb osata eristada olulist ebaolulisest, infot libainfost ning signaale mürast. Kui me seda ei tee, on tulemuseks üsna sageli häiritud tähelepanu ja keskendumisraskused, mis omakorda mõjutavad meie poolt tehtavaid otsuseid ning elukvaliteeti üldisemalt. Õnneks või kahjuks peame inimestena leppima looduse poolt antud sagedusaistinguga, mida tunnetame kuulmise teel. Kuuleme paratamatult – kas tahame või mitte. Kuuleme ühtemoodi nii meeldivaid kui ebameeldivaid helisid. Seega pole mürareostuse eest kaitstud keegi. Inimkõrv on oma olemuselt väga tundlik ja osav instrument, mis suudab eristada mitmeid akustilisi parameetreid – olles suuteline eristama helikõrgusi, valjusust, tämbrit, asukohta jpm.

Rääkides konkreetselt akustilisest mürast on tegemist mistahes soovimatu heliga. Kusjuures müra definitsioon võib indiviidide hulgas erineda olenevalt sellest, mida keegi häirivaks peab. Ka helid, mis muidu justkui paitavad kõrvu võivad aja jooksul muutuda talumatuks. Olgu selleks mitmesajandat korda kõlav muusikapala, muskelauto nurruv mootor või mõne jaoks isegi teise inimese hääl. Muidugi on võimalik müra mõistet üldistada leides, milliseid helisid peavad enamik inimesi häirivaks. Tuleb välja, et segavateks osutavad just lühiajalised ning äkilise iseloomuga helid, mis võivad ka tõsiselt kuulmist kahjustada. Näiteks lask relvast, sireenid, koera haukumine või maanduv lennuk. Ometi on selles nimistus olevate stressorite näol tegemist pigem harva esinevate nähtustega. Taustamüra nagu liiklushääled või ventilaatori undamine jääb tihtipeale märkamata. Pikaajaline mürarikkas keskkonnas viibimine mõjutab inimesi sellegipoolest. On teada, et müra tekitab otseselt stressi, ning see omakorda võib põhjustada näiteks unetust või söömishäireid, millest aastate jooksul võib kujuneda raske haigus [22].

Põhiliseks müra allikaks on sõidukid, nende liikumisest tingitud kohin ning mootori müra. Kuna märke müraallikate vähemaks jäämisest tulevikus ei ilmne, pigem vastupidi, siis tuleb üha enam mõelda alternatiivsetele meetoditele müra vähendamiseks. Üheks neist võiks olla aktiiv-mürasummutustehnoloogia.

Antud töö raames konstrueeritakse aktiiv-mürasummutustehnoloogial põhinev süsteem ning katsetatakse selle rakendatavust toru mudelil.

Selleks tuleb esmalt selgeks teha akustika põhitõed, millest on põgusalt juttu töö esimeses pooles. Töö teises osas käsitletakse kõlari ja mikrofoni tööpõhimõtet, kuna nende kahe seadme mõistmine on antud töö kontekstis oluline. Kolmandas osas keskendutakse mürasummutuse lähemale uurimisele. Selgitatakse lähemalt nii passiiv- kui aktiiv-mürasummutust. Töö praktiline osa on seotud katseseadme ehitamise, selle komponentide valiku, katseplaani väljatöötamise ja katse läbiviimisega. Viimaks viiakse katseandmete põhjal läbi analüüs ja tehakse järeldused töö edukuse kohta.

Töö teema valik on ajendatud suurest huvist akustika vastu ning selle vähesest käsitlusest õpitaval erialal. Samuti ei ole autori hinnangul aktiiv-mürasummutust Eestis piisavalt käsitletud ning mainimine valminud lõputöödes pigem harv.

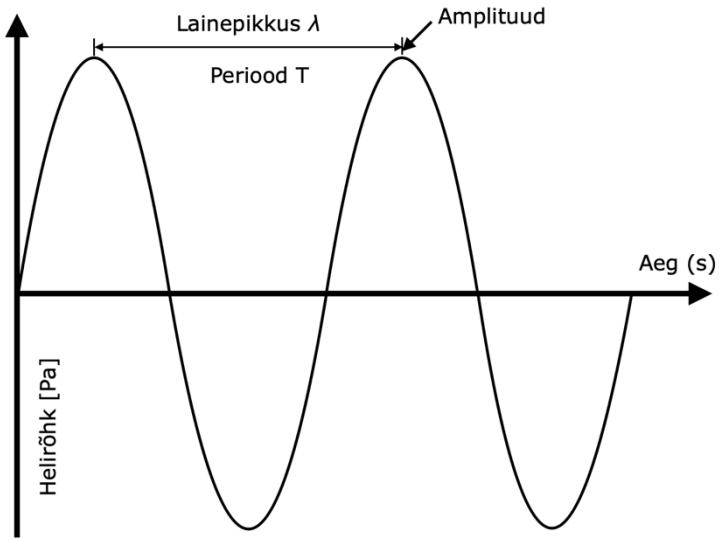
1. AKUSTILISED PARAMEETRID

Selleks, et käsitletavaid teemasid paremini mõista, tuleb esmalt selgeks teha mõned mõisted. Kusjuures akustikas kasutusel olevate terminitega saab kas otseselt või kaudselt paralleele tõmmata elektrotehnikas kasutusel olevate printsiipidega.

Heli on elastses keskkonnas leviv pikilaine. Elastseks keskkonnaks on üldiselt õhk, kuigi heli võib levida ka vedelikes ja tahkistes. Õhus levimise puhul tajutakse helina õhurõhu muutust, mis on põhjustatud heliallikast tekkinud võnkumistest. Heli käsitletakse lainena ning on seetõttu nagu paljudki teised füüsikalised nähtused kirjeldatav harmoonilise võnkumise võrrandiga:

$$p = Asin(\omega t + \psi) \tag{1.1}$$

p - helirõhk [Pa] A - laine amplituud $\omega t + \psi$ – faas



Joonis 1.1. Harmooniline laine

Amplituud – laine maksimaalne hälve tasakaalu asendist. Mida suurem on helilaine amplituud, seda suurem on helirõhk ning seega ka tajutav helitugevus.

Faas – Laine võnkumist kirjeldava võrrandi argument, mis koosneb nurgsagedusest ja algfaasist, mis kirjeldab laine suurust kindlal ajahetkel. Nurksagedus omakorda on leitav:

$$\omega = 2\pi f \tag{1.2}$$

Sagedus on pöördvõrdeline perioodiga, mis kulub ühe täisvõnke sooritamiseks. Sagedust mõõdetakse hertsides, ning on defineeritud kui võngete arv sekundis. Inimesed kuulevad helisid alates 20 Hz kuni 20 kHz. Mida suurem on sagedus, seda kõrgemana kuuldavat heli tajutakse. Kusjuures teatud sagedusi tajutakse intensiivsema kui teisi. Kõige tundlikum on kõrv sagedusvahemikus 2-4 kHz. Liiklusmüra sagedus jääb 1kHz ümber. [2]

Heli levib õhus vastavalt temperatuurile kindla kiirusega. [3]

$$c = 331 + 0{,}6t \tag{1.3}$$

Valemist tulenevalt on 20℃ juures heli levimiskiirus 343 m/s.

Lainepikkus on kaugus kahe laine tipu vahel (vt joonis 1.1). Lainepikkus on võrdeline heli levimiskiiruse ja sageduse suhtega:

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{1.4}$$

Seega ühessuguses keskkonnas sõltub valemist lähtuvalt leviva laine pikkus pöördvõrdeliselt sagedusest. Mida suurem sagedus ehk mida kõrgem tajutav heli, seda väiksem lainepikkus.

Helirõhk *p* on helina aistitav õhurõhu muutus, mida mõõdetakse paskalites. Kui atmosfääriline õhurõhk on umbes 100kPa, siis kuulde- ja valuläve vahemik jääb 0,000020...20Pa vahele. Kõrv on seega väga tundlik instrument, mille tajutava helirõhu vahemik on miljonikordne. [1]

Helitugevus on helirõhu logaritmiline väljendusviis, mida mõõdetakse detsibellides.

$$L_0 = 20log_{10}\frac{p}{p_0} \tag{1.5}$$

L_0 – helitugevus [dB], p – helirõhk [Pa], p_0 – kuulmislävi ($p_0 = 20\ \mu Pa$)

Kui heliallika poolt tekitatud õhuosakeste liikumine on harmooniline ehk muutub ajas sinusoidselt, muutub vastavalt ka helirõhk ning tekib puhas toon. Heliallikast pärinev heli aga pole üldiselt puhas toon. Allika põhitoon sisaldab täisarv kordseid toone ehk **harmoonikuid**. Näiteks 50 Hz sumin sisaldab mõningal määral ka 100 ja 150 Hz komponente. Igal helil on seega oma spekter, mille uurimisel saab kindlaks teha, milliseid sagedusi ja mis valjusega heli sisaldab. [18]

2. VALJUHÄÄLDI JA MIKROFONI TÖÖPÕHIMÕTE

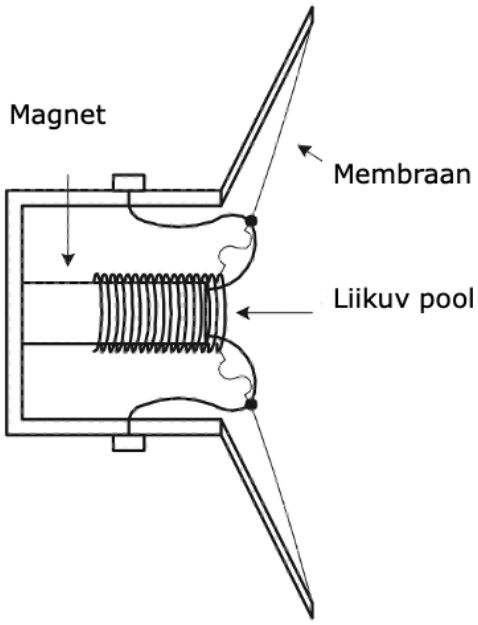
Antud töös on määrava tähtsusega kaks põhilist elementi, mis oma tööpõhimõttelt väga ei erinegi – nendeks on valjuhääldi ja mikrofon. Siinkohal saab paralleeli tuua mootori ja generaatoriga – üks muundab elektrilise energia mehaaniliseks ja teine vastupidi. Sisuliselt on tegemist ühe ja sama seadmega, mis tähendab, et tema funktsionaalsus on pööratav. [2] Sama kehtib ka valjuhääldi ja mikrofoni kohta. Kumbki on mõeldud täitma erinevaid ülesandeid, kuid puht füüsilise väljanägemise ja ehituse poolest on omavahel täiesti eristatavad. Ometi selgub, et tööpõhimõttelt on tegemist küllaltki sarnaste seadmetega.

Valjuhääldi on elektroakustiline muundur helisageduslike elektrivõngete muundamiseks nendega analoogseteks helilaineteks. [6]

Mikrofon on elektromehaaniline muundur tema membraanile helirõhust põhjustatud jõu muundamiseks helisageduslikuks vahelduvpingeks. [2]

Ühtlasi selgub, et nende kahe seadme füüsikaline taust järgib samu põhimõtteid, mis teisedki elektrimasinad:

Asetsegu juhe pikkusega *l* püsimagneti kahe pooluse vahelises õhupilus, kus magnetvoo tihedus on *B*. Kui seda juhet läbib elektrivool I mõjub juhtmele jõud:



Joonis 2.1. Valjuhääldi ehitus [9]

$$F = BIl \qquad (2.1)$$

Seega kasutatakse *Ampere* seadusena tuntud printsiipi lisaks elektrimasinatele ka valjuhääldis, kuid mõlemas on sirgjuhtme asemel kasutusel pool.

Valjuhääldi puhul kantakse magneti ümber paikneva elektripooli liikumisest tekkiv jõud üle membraanile. [2] Membraan omakorda tekitab õhuosakeste võnkeid, mis väljenduvad helina. Kuna pool on mähitud ümber varda, siis saab liikumine olla vaid ühes teljes ehk edasi-tagasi suunas. Sellest tulevalt võib öelda, et valjuhääldi puhul on tegemist lineaarse mootoriga. [9]

Valjuhääldeid saab liigitada sageduse põhjal:

1) Madalsageduslikud - *woofer* (alla 200Hz)
2) Kesksageduslikud (500 – 3000 Hz)
3) Kõrgsageduslikud - *tweeter* (3-16 kHz)

Ühtlasi tuleb valjuhääldi valikul lähtuda võimsusest ja nimitakistusest. Viimase puhul on jaotus vastavalt kas 4, 8 või 16 oomi. Elektriahelas käituvad kõlarid kui takistid ning samamoodi on võimalik neid omavahel ühendada kas järjestikku või paralleeli. [9]

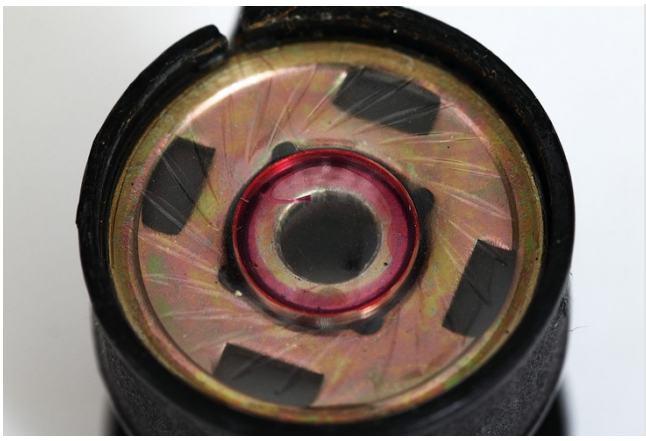
Vastupidiselt valjuhääldile saadakse mikrofonis pöördprotsessi tulemusel helilainetest hoopis elektriline signaal.

Mikrofoni membraanile avalduv helirõhk kantakse jõuna üle elektripoolile pikkusega *l*, mis omakorda põhjustab selle liikumist kiirusega *v*. Ühtlasi indutseerub sel juhul juhtmes elektromotoorjõud:

$$E = -\frac{d\phi}{dt} = -Blv \tag{2.2}$$

See aga tähendab, et muundur, antud juhul mikrofon töötab generaatori režiimis. [2]
Laias laastus jagatakse mikrofonid kaheks.

1) Dünaamiline mikrofon töötab analoogselt valjuhääldiga. Indutseeritava pinge suurus sõltub otseselt membraani liikumise kiirusest. Sellise mikrofoni eripäraks on madal tundlikkus ning vajab seepärast suurt võimendust. [5]
2) Kondensaatormikrofon koosneb kahest lähestikku paiknevast metallplaadist. Membraaniks on sel juhul õhuke metallplaat, mis reageerib väga tundlikult helirõhu muutusele, põhjustades sellega mahtuvuse muutuse. Kuna aga kondensaatorisse salvestuv energia on võrdlemisi madal, vajab seadeldis töötamiseks lisatoidet, tavaliselt on selleks +48 V fantoom. [8]

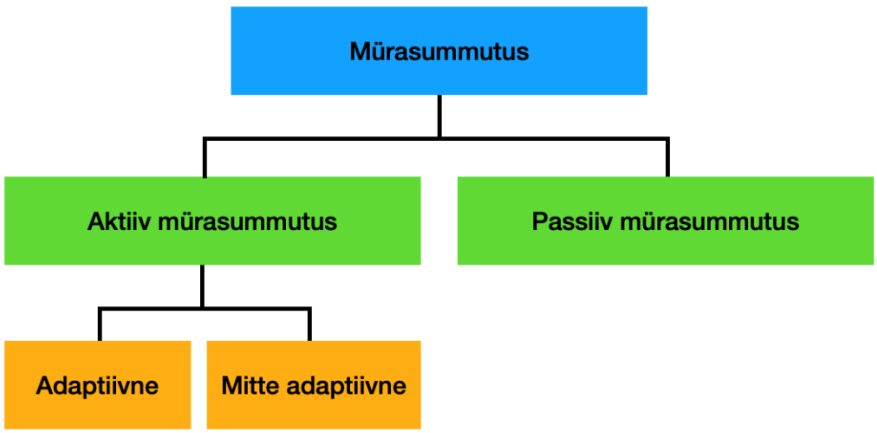


Joonis 2.2. Dünaamiline mikrofon [7]

Joonis 2.3. Kondensaator mikrofon [8]

3. MÜRASUMMUTUS

Mürasummutuse all mõeldakse tavaliselt müraallika isoleerimist, saavutades seeläbi helirõhu langus kuulaja suhtes. Heli isoleerimine võimaldab vähendada helide ülekandumist ühest ruumist teise. Müratõrje peamine eesmärk on leida kõige valjem heliallikas ning summutada just see. Traditsiooniliselt toimub müra summutamine passiivselt ehk füüsiliste tõkete abil. Mürasummutusest on enim kasu kui seda rakendada kas müra allika või siis just vastuvõtja vahetus läheduses. [3]

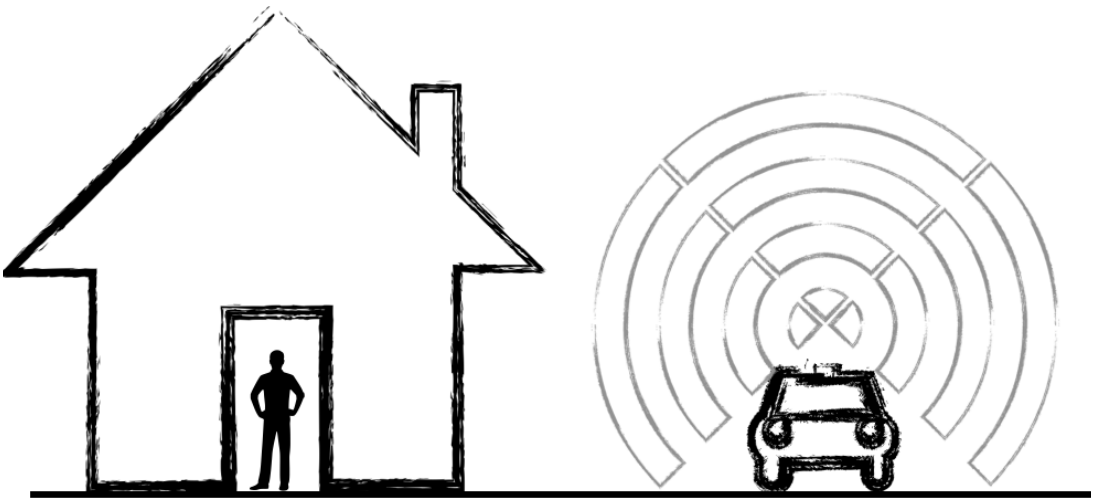


Joonis 3. Mürasummutuse klassifikatsioon

3.1. Vajadus

Müral on negatiivne mõju inimeste tervisele ja heaolule üldisemalt. Mürarohketes piirkondades paiknevad elumajad, büroohooned, tööstushooned, lennujaam jt põhiliselt linnataristu objektid kannatavad enim mürareostuse käes. Tervise seisukohast lähtuvalt peetakse kahjustavaks müra alates 55 dB. Muuseas on Euroopa keskkonnaagentuuri andmetel teada, et näiteks ainuüksi Tallinnas elab sellistes tsoonides 58% elanikest. Mürarohkes piirkonnas elavate inimeste terviseprobleeme on seostatud unehäirete, ülekaalulisuse ja südameveresoonkonna haigustega. Seega on müra summutamine eluliselt tähtis. [18]

Nagu ikka, on võimalik tegeleda kas põhjuse või tagajärjega. Nii ka müra puhul – kas isoleerida allikas või vastuvõtja. Heli levimine sõltub nende kahe vahele jäävast teekonnast - selle distantsist ning takistustest. Joonisel 3.1 on müraallikaks auto ning vastuvõtjaks inimene. Nagu jooniselt näha on heli levimine tõkestatud. Helilained peegelduvad maja seinalt tagasi, kuid osa nendest suundub ka läbi konstruktsiooni, jõudes vastuvõtjani.



Joonis 3.1. Müra allikas ja vastuvõtja

Mürareostuse peamiseks murekohaks on liiklus. Autode poolt tekitatav lärm koosneb põhiliselt kahest komponendist: mootori- ja rehvimürast. Madalatel kiirustel domineerib mootorimüra. [15] Kuigi viimaste aastate jooksul on teedel rohkem elektriautosi, mis seda probleemi vähendab, on jätkuvalt problemaatiline just rehvimüra levik, mis on seotud hõõrdumisega. Mida suurem on sõiduki kiirus, seda valjem on ka rehvidest tingitud kohin. Seega on sõidukite puhul allika otsene isoleerimine mõneti võimatu, ning seetõttu kasutatakse teede äärde püsitatud müratõkkeid, aga ka majaseinu, haljastust ja kiirusepiiranguid.

Mitme müraallika puhul on mõistlikum kaaluda mürasummutamist vastuvõtja vahetus läheduses. See tähendab põhiliselt hoonete mürakindlaks tegemist. Ehitiste puhul on helipidavus suurim seintel ning kehvem uste ja akende puhul, mistõttu oleks loogiline pöörata tähelepanu just neile. Ruumi akustiliste omaduste parandamine muudab keskkonda inimsõbralikumaks ja hubasemaks. [3]

Eesti standardi EVS 932:2017 punkt 6.1.13 kohaselt kirjeldatakse hoone akustikat järgmiselt: „Hoone akustika käsitleb ruumide piisavat heliisolatsiooni väliskeskkonna müra eest, ruumide vahelist heliisolatsiooni (õhu- ja löögimüra isolatsiooni), ruumide otstarbekohaseid ruumiakustilisi tingimusi ning tehnoseadmete müritaset hoone ruumides ja hoonet ümbritseval territooriumil. “ [20]

Müraallikas võib asetseda ka hoones sees. Vajadus müra summutada oleneb hoone otstarbest. Vastuvõtja vahetus läheduses on müra summutamine põhjendatud. Samas kui müra häirivus ei osutu otseselt probleemiks, pole seda tingimata vaja teha. Näiteks pumbajaama puhul, mis asub mitmesaja meetri kaugusel elamutest, sumbub müra keskkonda loomulikul teel, ega vaja sekkumist. [19]

3.2. Passiiv mürasummutus

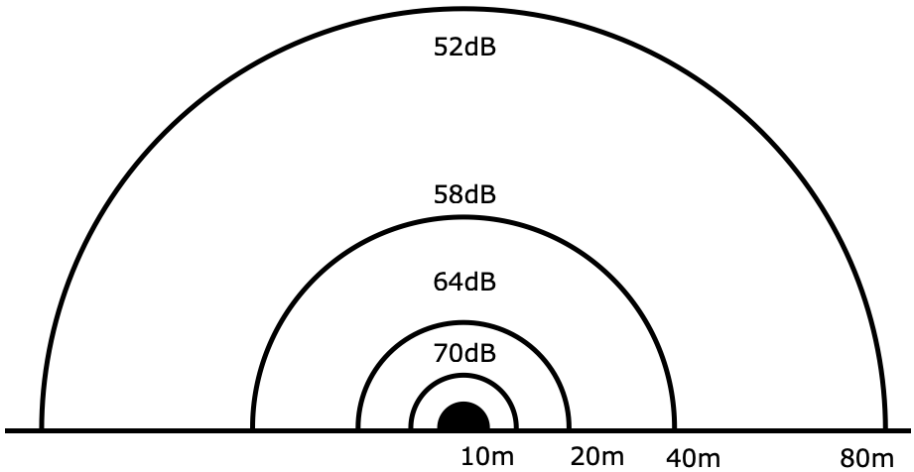
Passiivne helisummutus saavutatakse füüsiliste tõkete abil, millelt heli vastavalt peegeldub ja neeldub. Selliseid tõkkeid kutsutakse tarinditeks ning neil on mitmeid akustilisi omadusi. Üheks nendest on helineelduvus. Suure helineelduvusega materjalides jäävad helilained justkui „lõksu", mille tulemusel helienergia sumbub muundudes soojuseks. Sellised materjalid on poorse struktuuriga: näiteks kivivill, poroloon, tekstiil. Selliste materjalide kasutamine parandab ruumisisest akustikat, muutes heli tuhmimaks ning vähendades peegeldustest tingitud kaja teket. Helineelduvus ja heliisolatsioon ei ole aga samased mõisted. Näiteks kiviseina puhul on helineeldumine väike aga seevastu isolatsioonivõime tänu suurele massile kõrge. [3]

Tarindi õhuisolatsiooni moodustumine

Tarindis sõltub helikiirus sagedusest. Mida kõrgem on sagedus, seda parem on heliisolatsioonivõime. Kesksageduste puhul saadakse kahekordse sageduse kasvamisel 6 dB heliisolatsiooni võime kasv. Sama tulemus saadakse ka heliisolatsiooni materjali massi kahekordistamisel. [3]

Helitugevuse vähenemine allika ja vastuvõtja vahelise kaugusega

Ühtlasi sumbub helienergia heliallika ja vastuvõtja vahelise distantsi suurenemisel. Avatud väljal levivad punktheliallikast tulevad helilained kõikvõimalikes suundades. Helirõhk väheneb pöördvõrdeliselt distantsiga. Helirõhk teisendatuna logaritmilisse skaalasse annab helitugevuse detsibellides. Heliallikast eemaldumisel väheneb helitugevus 6dB iga kahekordse vahemaa kohta (vt joonis 3.2). [1]



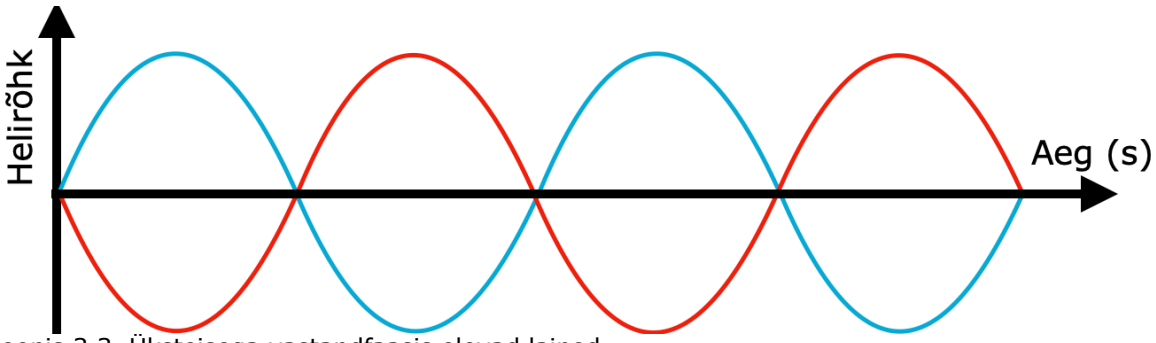
Joonis 3.2 Näide helitugevuse vähenemisest distantsi suurenemisel.

3.3. Aktiiv-mürasummutus

Aktiiv-mürasummutuse korral kasutatakse helide summutamiseks hoopis lisa helienergiat. Tegemist on elektroonilistest komponentidest koosneva süsteemiga, mille põhielementideks on kõlar ja mikrofon. Aktiiv-mürasummutusel on täheldatud enim efekti madala sagedusega monotoonsete helide puhul. [21]

3.3.1. Tehnoloogia

Kahe ühesuguse (sageduse ja amplituudiga) laine omavahelisel liitumisel tekib interferents. Sõltuvalt sellest, kuidas nad teineteise suhtes paiknevad, lained kas võimendavad teineteist või vastupidi kustutavad. Maksimaalne võimendamine toimub siis kui faasinihe puudub. Selliselt juhul on tulemuseks kaks korda suurem amplituud, põhjustades 3 dB suuruse helitugevuse kasvu. Kui aga faasinihke nurk on nt 180 kraadi ehk ühe laine põhi ja teise hari on kohakuti (vt joonis 3.3) moodustub resultantlaine amplituudiga null. Sellist nähtust kutsutakse täielikult destruktiivseks interferentsiks ning on aktiiv-mürasummutuse põhiprintsiip. [1]



Joonis 3.3. Üksteisega vastandfaasis olevad lained

Helitugevuse vähendamiseks saab kaks heliallikat ruumis seada teineteise suhtes nii, et nad on vastandfaasis, kus üks helilaine on pool perioodi hilistatud. Selleks tuleb üht heliallikat füüsiliselt nihutada teise suhtes. Saavutades olukorra, kus primaar ja sekundaar heliallikas on teineteisest poole lainepikkuse kaugusel hakkavad signaalid teineteist summutama, ning tulemuseks on vähendatud helitugevus.

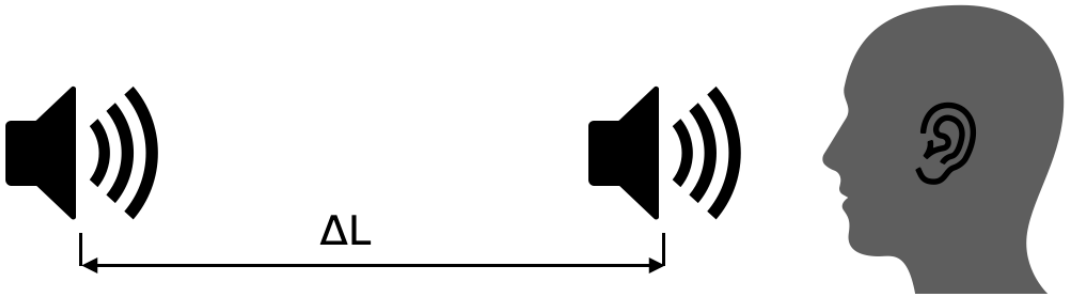
2π ehk 360 kraadi suurune faasivahe ϕ vastab ühele lainepikkusele λ . Seda on võimalik valemi 3.1 kaudu siduda kahe heliallika vahelise distantsiga ΔL (vt joonis 3.4). [1]

$$\frac{\phi}{2\pi} = \frac{\Delta L}{\lambda} \tag{3.1}$$

Saame, et

$$\Delta \mathrm{L} = \frac{\phi\lambda}{2\pi}$$

Täielikult destruktiivne interferents toimub, kui faasivahe ϕ on 180 kraadi ehk π. Sama tulemuse annab tegelikult ka mistahes teine paaritu arv kordne faasivahe $(\pi;\ 3\pi; 5\pi; \ldots)$.



Joonis 3.4. Täielikult destruktiivse interferentsi tekitamine valjuhääldi vahemaa kaudu.

Näide

Olgu meil ruumis kaks valjuhääldit ning kummastki tuleb ühesugune puhas toon sagedusega 440Hz. Kuna heli sagedus ja levimiskiirus on kummastki kõlarist tuleva laine puhul samad, on ka nende kahe helilaine lainepikkus sama. Seda on võimalik lihtsasti välja rehkendada rakendades valemit 1.4:

$$\lambda = \frac{c}{f}\ \frac{343\ m/s}{440\ 1/s} = 0{,}779545\ m\ \approx\ 78cm$$

Teades valemi 3.1 põhjal, et täielikult destruktiivne interferents tekib kui kahe heliallika faasinihe $\phi = \pi$, et

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2} = \frac{78}{2} = \ 39cm$$

Seega tuleb sekundaar heliallikas asetada esimesest pool lainepikkust ehk 39 cm eemale

Teoreetiliselt kustutavad helilained ka ennast kui faasivahe $\phi = 3\pi$. Sellisel juhul peaks kaks heliallikat asuma teineteisest kaugusel:

$$\Delta L = \frac{3\pi\lambda}{2\pi} = \ 1{,}5\lambda\ =\ 1{,}5 \cdot 78 = 117cm$$

Polaarsus

Täielikku destruktiivset interferentsi on võimalik saavutada ka sekundaar heliallika polaarsuse muutmisega. Selleks tuleb lihtsalt ühe kõlari külge ühendatud juhtmed omavahel ära vahetada. Sisuliselt pööratakse sellega signaal tagurpidi, ehk helilained satuvad üksteise suhtes vastandfaasi. See tähendab seda, et kui ühe valjuhääldi membraan liigub ette, siis teisel samal ajal taha. Negatiivse ja positiivse lainefrondi samaaegne kokkusaamine resulteerub vaiksema signaalina. Kirjeldatu ongi aktiiv-mürasummutuse printsiibi aluseks. [22]

3.3.2. Kasutusalad

Aktiiv-mürasummutus tehnoloogia on viimastel aastatel leidnud enim rakendust kõrvaklappides. Seda ka täiesti mõistetavatel põhjustel.

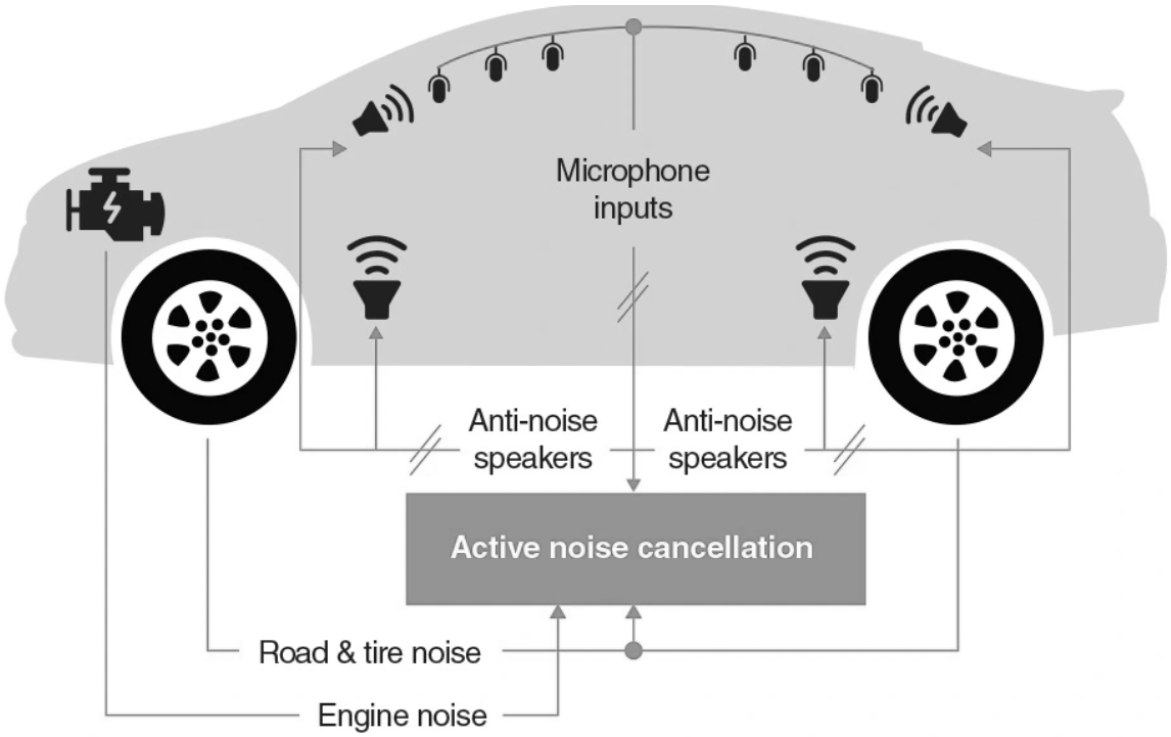
1) Vastuvõtja vahetus lähedus. Heliallikas otse kõrva juures või isegi sees.
2) Suunatavus. Heli (ja ka vastuheli) on võimalik suunata otse vastuvõtjale kõrva.
3) Kõrvaklapid pakuvad teatud määral ka passiivset mürasummutust.
4) Kõrvaklappidest saab mängida muusikat, mis „matab" soovimatud helid. Tööpõhimõte: vaiksema müraallika summutamine valjemaga. [3]
5) Audiofirmade poolt pakutavad tooted on konkurentsi tõttu muutunud taskukohasemaks ning on ka järjest kasutajasõbralikumad.

ANC kõrvaklappide funktsionaalsus sõltub suuresti keskkonna müra olemusest – selle sagedusest ja komplekssusest üldisemalt. Erinevate toodete toimivust on uuritud mitmetes eksperimentides. Kusjuures on tähendatud, et teatud sagedustel on võimalikuks osutunud ka vastupidine efekt – nimelt on müra tugevus hoopis suurenenud. Üldiselt täheldati ANC kõrvaklappidel positiivset mõju enim 100...1000Hz ümber. Näiteks 150 Hz sagedusega tooni mängimisel vähenes Bose QC25 klappide puhul müratase 30dB. [21]

Teine suur valdkond, kus aktiiv-mürasummutust edukalt rakendatakse on ventilatsioon. Mitmed ettevõtted pakuvad just sellel tehnoloogial põhinevaid mürasummuteid. Üheks nendest on Prantsusmaa päritoluga firma *TechnoFirst*. Kontseptuaalselt on tegemist kõlarist ja kahest mikrofonist koosneva silindrilises korpuses paikneva kassetiga. Näiteks 125 Hz puhul on saavutatud 16dB võrra madalam helitase. Muuseas on nad turule toonud enda sõnul maailma vaikseima fööni. [10]

Ventilatsiooni puhul on põhiliseks müraallikaks ventilaator (elektrimootor) ise, mille töötamisel tekkiv müra kandub siseruumidesse sissepuhke- ja väljatõmbe kanali kaudu. Müratase sõltub siinkohal näiteks ventilaatori pöörlemiskiirusest, aga ka kanaliosade konstruktsioonist (kanali pikkus, muhvid, siibrid jne). Samuti tasub ära mainida, et ühiskanalisüsteemiga hoone puhul kanduvad ventilatsiooni kaudu edasi ka teistest ruumidest pärinevad helid. [3]

Lisaks on ANC tehnoloogiat rakendatud ka õhu- ja maismaa sõidukite salongides. Seal on soovitud tulemuse saavutamine oluliselt keerulisem, kui näiteks kõrvaklappide puhul. Arvestada tuleb inimeste paiknemisega ruumis, et tekitada n-ö surnud välju, kui ka sellega, et müra levib mitmes suunas. Sellise probleemi lahendamiseks on tingimata vaja palju rohkem kõlareid ja mikrofone, muutes süsteemi küllaltki keeruliseks. [11]

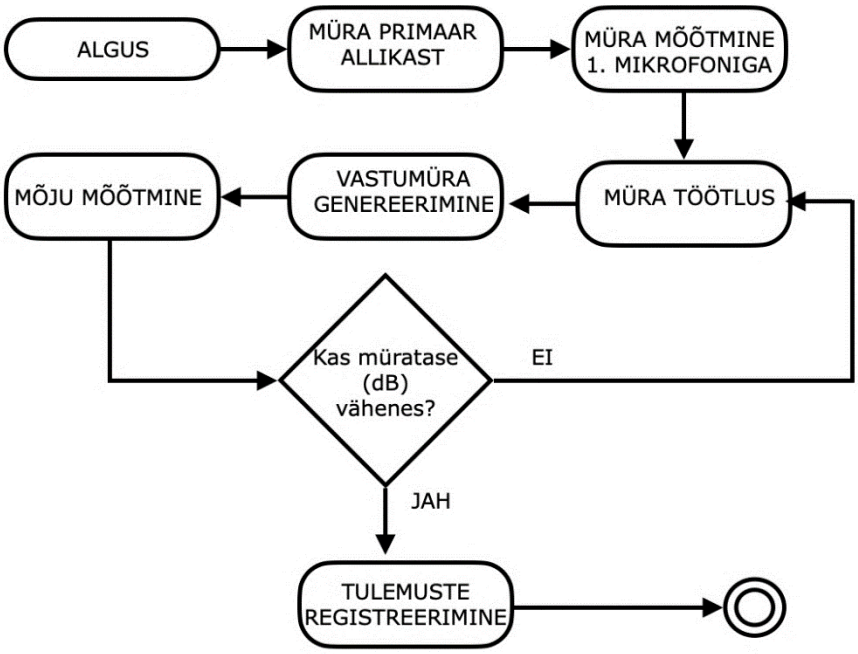


Joonis 3.5. Aktiiv-mürasummutuse kasutamine auto salongis [11]

Konkreetselt autode puhul on ANC tehnoloogia kasutamisel veel võimalusi. Näiteks saab mootorimüra vähendamiseks heitgaaside väljalaske süsteemi külge aretada sarnase mudeli nagu seda on järgmises osas käsitletav katseseade.

4. KATSESEADELDISE KONSTRUEERIMINE

Töö katselise osa eesmärk on välja selgitada, kas ja millisel määral on silindrilises ruumis aktiiv-mürasummutus tehnoloogiat rakendada. Olgu mainitud, et vastavalt joonise 4.1 jaotisele konstrueeritakse mitteadaptiivne aktiiv-mürasummutus süsteem. Süsteemi häälestamine toimub käsitsi. Muudetavad parameetrid on polaarsus, valjuhääldite vaheline kaugus, signaali hilistumisaeg ning helitugevus. Katse viiakse läbi toru mudeli peal. Hindamiseks kasutatakse müramõõturit ja mikrofoni, millega mõõdetakse helitaseme langus detsibellides.



Joonis 4.1. Katse läbiviimise algoritm

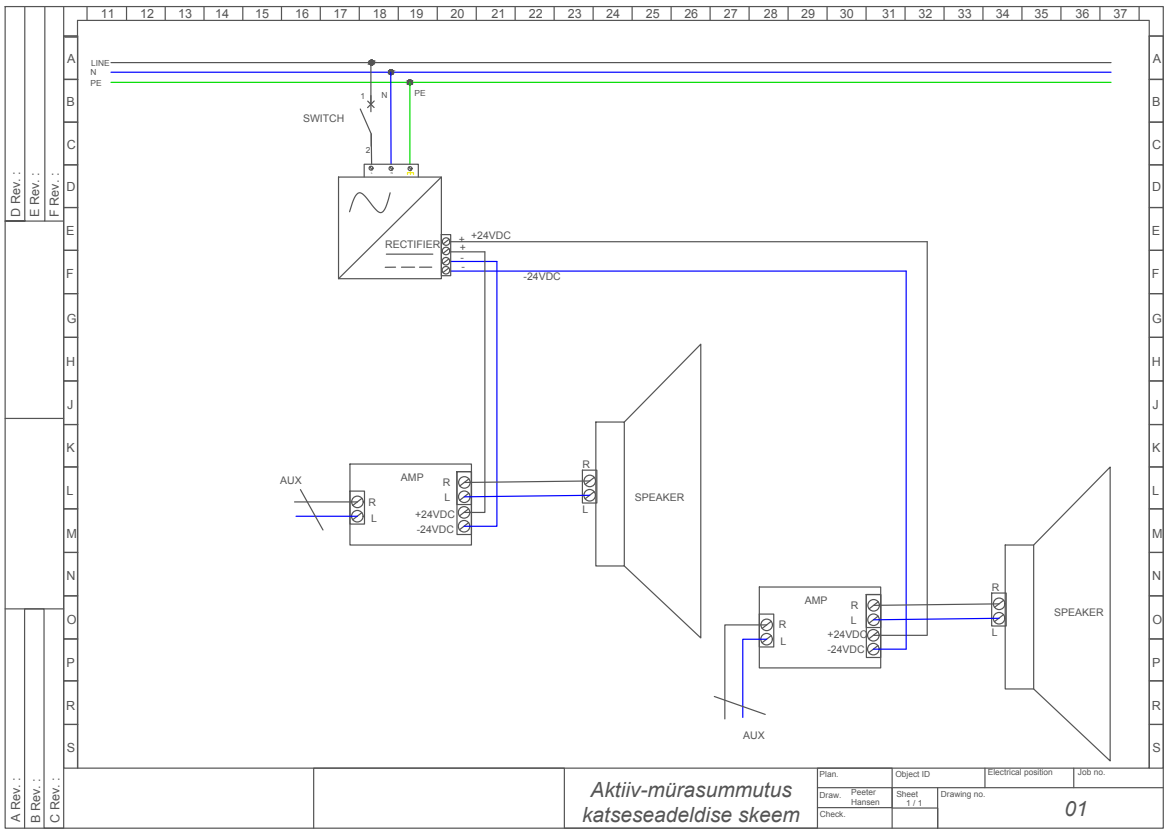
Silindrilise ruumi kõige levinum kuju on lihtne sirge toru. Peamine põhjus, miks antud tööd viiakse läbi toru mudeli põhjal on helilainete suunatavus. Avatud ruumis tekitab heliallikas keralaine, mistõttu levib heli igas suunas. [2] Samuti tekiks ruumis probleem peegeldustega, mistõttu on heli käitumist raske ette ennustada ning ka modelleerida. Tõsi, ka torus esineb peegeldusi, ent nende mõju on oluliselt väiksem. Lisaks on torupõhise mudeli rakendusvaldkondi palju - ventilatsioon, korstnad, autode heitgaasi väljalaskesüsteemid on vaid mõned näited. Katseseadeldise ehitamiseks kasutan käepäraseid ning suuresti olemasolevaid vahendeid/seadmeid. Füüsilise mudeli realiseerimiseks on kasutusel PVC toru ja kolmikliitmik. Toru ühte otsa kinnitatakse primaarne (müra)allikas ning kolmikliitmiku külge sekundaarne valjuhäältdi, mis hakkab tootma vastumüra (vt joonis 4.3).

Metoodika väljatöötamine

Aktiiv-mürasummutust on võimalik teostada nii ruumiliselt (kahe kõlari vahelise kaugusega) kui ka elektriliselt. Aktiiv-mürasummutust teostatakse antud töös elektriliselt kahel meetodil:

1. Signaali hilistamisega
2. Polaarsuse muutmisega

Aktiiv-mürasummutus süsteemi elektriskeem näeb välja järgmine:



Joonis 4.2. Aktiiv-mürasummutust teostava katseseadeldise elektriskeem

3. Samuti viiakse läbi katse, kus kahe valjuhääldi vahelise kaugusele peab vastama pool lainepikkust ehk kindel sagedus, mistõttu signaalid peaksid teineteist nõrgendama.

Meetod signaali hilistamisega

Harmoonilise signaali puhul, millel on kindel sagedus on võimalik helilained viia omavahel vastandfaasi ajalise nihkega. Sellise viivituse tekitamiseks on mitmeid võimalusi. Antud lahenduses viiakse katse läbi kasutades *delay* efektiprotsessorit, millega on just nimelt võimalik teostada signaali ajalist hilistumust. Kuna sageduse pöördväärtus on periood, on võimalik igal sagedusel välja rehkendada sobiv hilistus. Kui soovitakse teostada aktiivmürasummutust peab hilistus olema võrdne poolperioodi suurusega. Samuti peab ajaline viivitus olema igal sagedusel erinev (vt tabel 4.1).

Tabel 4.1. Testitavatele sagedustele vastavad poolperioodi väärtused

Sagedus (Hz)	Periood (ms)	Poolperiood (ms)
100	10	5
250	4	2
440	2,27	1,14
750	1,33	0,67
1000	1	0,5
1500	0,67	0,33

Tabelist 4.1 on selgelt näha, et mida kõrgem sagedus, seda väiksem peab olema hilistusaeg. Kuna tegemist on harmooniliste toonidega, ehk signaalid on korduva iseloomuga siis võib kõrgematel sagedustel olla täpset hilistust raske seadistada. Lisaks tuleb arvesse võtta toru pikkust ning aega, mis kulub helilainel kahe valjuhääldi vahelise vahemaa läbimiseks. See sõltub omakorda ka heli levimiskiirusest, mida omakorda mõjutab õhutemperatuur.

$$t = \frac{L}{c} = \frac{1{,}7}{337} = 0{,}00504\ s \approx 5\ ms$$

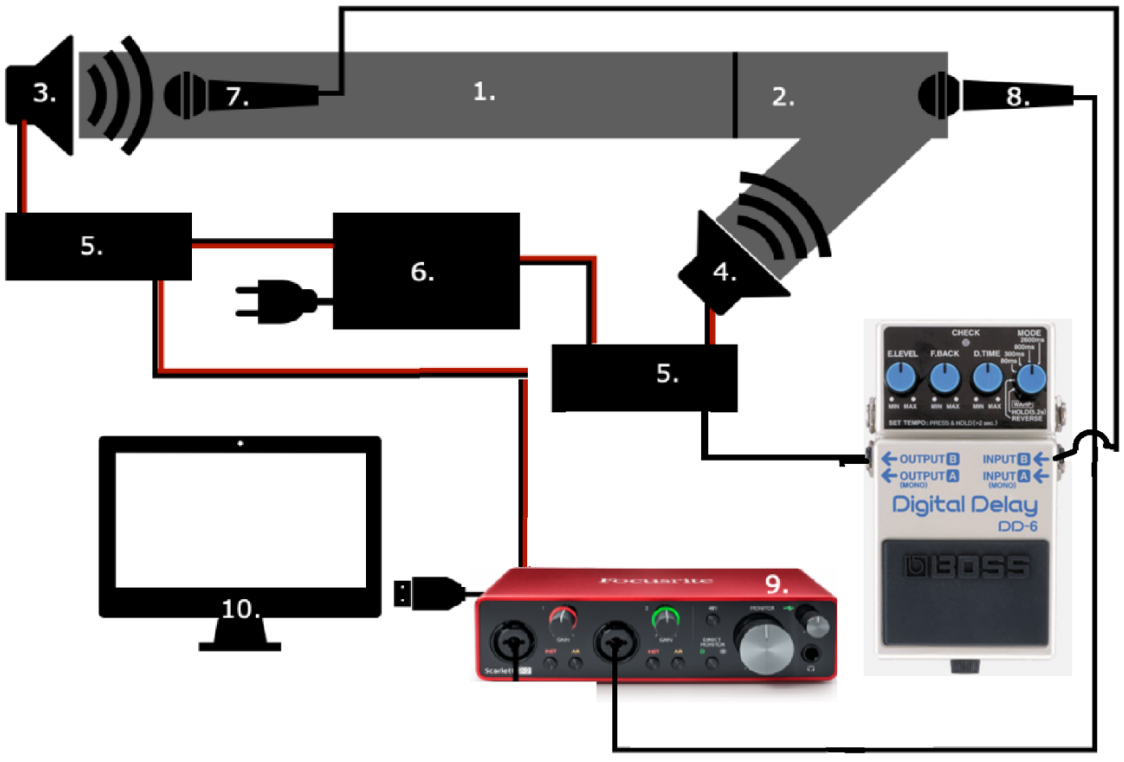
Seega heli levimiseks torus kahe valjuhääldi vahel kulub 5 ms. Teoreetiliselt võiks selle aja liita kindla sageduse poolperioodi pikkusele otsa, ent arvestada tuleb ka seadmete (efektiprotsessori, helikaardi) ja nendes signaalide töötlemiseks kuluva aja ehk *latency-ga.* Samuti on oma mõju ka toru otsa peegeldustel. Seetõttu saadaks optimaalseim ajalise nihe proovimise teel. Kusjuures sobivaid hilistusi võib olla mitu. Tasub ära mainida, et kui hilistus tekitab vastumüra valel ajahetkel siis helilained hoopis võimendavad teineteist, mis resulteerub valjema helitugevusena.

Süsteem koosneb erinevatest osadest: müraallikas, vastumüra allikas ja mõõtmine.

Müraallika moodustavad primaarvaljuhääldi (3), võimendi (5) ja selle toiteplokk (6), helikaart (9) ja arvuti (10). Helisignaal tekitatakse arvutis Audacity tarkvara põhise mürageneraatoriga. Edasi liigub signaal läbi helikaardi võimendisse ning seejärel primaarvaljuhääldisse. Helitugevust on võimalik reguleerida mitmeti: nii programmis, helikaardil kui ka võimendi pealt.

Vastumüra allika moodustavad sekundaarvaljuhääldi (4), võimendi (5) ja selle toiteplokk (6), primaarmikrofon (7) ja delay efektiprotsessor (11). Mikrofon on ühendatud efektiprotsessori sisendisse ning väljund sekundaarvaljuhääldi võimendisse.

Mõõtmine toimub sekundaarmikrofoni, helikaardi ja arvuti programmi abil.



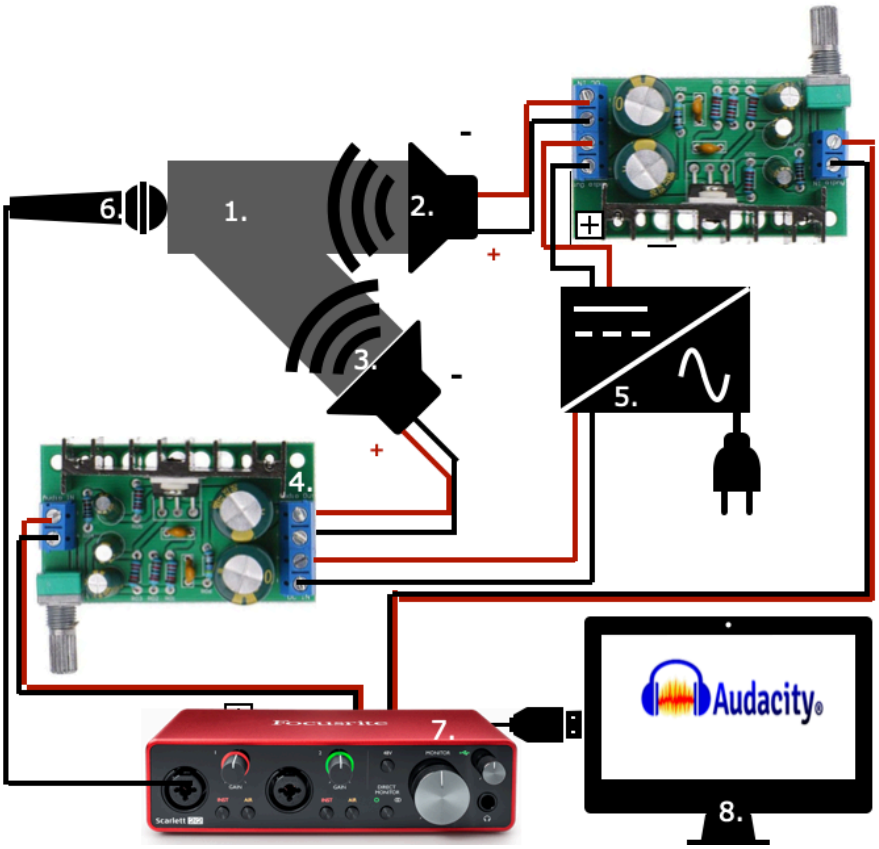
Joonis 4.3. Aktiiv-mürasummutus katseseade skeem signaali hilistamismeetodil

Tabel 4.2. Katseseadme skeemi selgitus

1.	PVC toru	6.	Võimendi toiteplokk
2.	PVC toru kolmikliitmik	7.	Primaar mikrofon
3.	Primaar valjuhääldi	8.	Sekundaar mikrofon
4.	Sekundaar valjuhääldi	9.	Helikaart
5.	Võimendi	10.	Arvuti
		11.	Delay efektiprotsessor

Muudetud polaarsuse meetod

Torumudeli küljest on eemaldatud pikk toru ning kaks valjuhääldit asetsevad kohakuti. Sekundaar valjuhääldil muudetakse ära polaarsus. Kuna mõlemad valjuhääldid töötavad sama signaali alusel, siis hakkavad helilained teineteist nõrgendama. Sekundaarvaljuhääldi sooritab igakord primaar müraallika suhetes vastassuunalise liikumise. Signaal tuleb taaskord Audacity signaaligeneraatorist. Kusjuures sekundaar valjuhääldi helitugevust on võimalik reguleerida võimendi potentsiomeetriga.



1.	PVC toruliitmik
2.	Müraallikas
3.	Sekundaar valjuhääldi
4.	Võimendi
5.	Võimendi toiteplokk
6.	Mõõtmismikrofon
7.	Helikaart
8.	Arvuti

Joonis 4.4. Katseseadeldise skeem muudetud polaarsuse meetodil.

Reaalses rakenduses võiks müraallikat asendada mikrofon, mis korjab üles mürasignaali ning paiskab selle ümberpööratud polaarsusega sekundaarvaljuhääldisse. Nagu töö teoreetilises osas sai tõdetud, käitub mikrofon sarnaselt valjuhääldile, muundades õhuosakeste mehaanilise liikumise (ehk heli) elektriliseks signaaliks.

Mürasummutamine kahe valjuhääldi vahelise kaugusega

Esmalt viiakse läbi katse, kus kaks heliallikat summutavad teineteise helilaineid vaid ruumilise nihke abil. Selleks peab kahe valjuhääldi vahele jääv distants ($\Delta L = 1{,}7m$) võrduma kindlale sagedusele vastava laine poole lainepikkusega (vt valemit 3.1).

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2} \quad \Rightarrow \quad \lambda = 2\Delta L = 3{,}4m$$

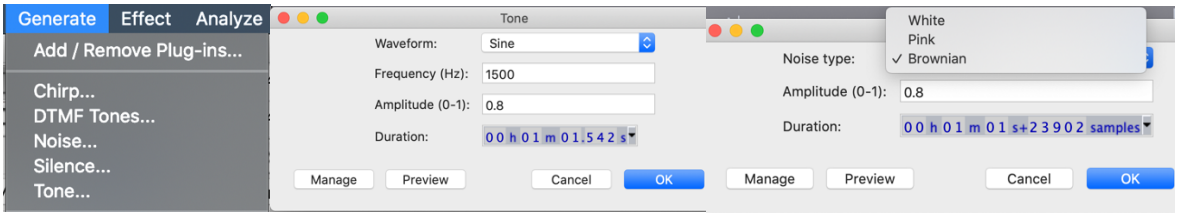
Rakendades taaskord valemit 1.4 saab sellele lainepikkusele vastava sageduse välja rehkendada:

$$\lambda = \frac{c}{f} \;\Rightarrow\; f = \frac{c}{\lambda} = \frac{337\ m/s}{3{,}4\ m} = 99{,}1Hz$$

Mõlemast valjuhääldist mängitakse sama valjudusega siinustooni sagedusega 100Hz. Arvutuslik sagedus võib mõnevõrra erineda tegelikkusest, kuna oleneb õhu temperatuurist ja kahe heliallika vaheline kaugus võib pisut erineda.

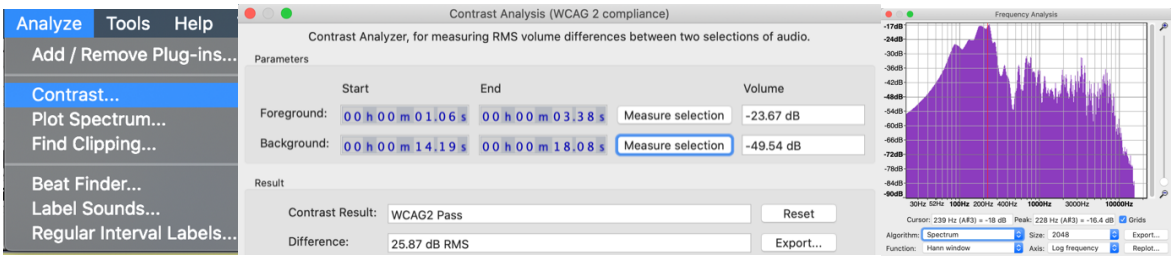
Tulemuste registreerimine ja signaaligeneraator

Tulemused salvestatakse vabavaralise arvutitarkvaraga Audacity. Lisaks salvestamisele saab selles programmis genereerida erinevaid signaale, nii kindla sageduse ja amplituudiga puhtaid toone kui ka valget, roosat ja pruuni müra.



Joonis 4.5. Audacity signaaligeneraator

Samuti on võimalik salvestatud tulemusi analüüsida. Näiteks võrrelda helinivoosid ning teha spektraalanalüüsi. Signaali helitugevuse vahe leidmiseks tuleb valida salvestatud *helitrackil* sobivad vahemikud ning tulemus kuvatakse seejärel detsibellideis. Spektri leidmiseks tuleb samuti valida soovitud vahemik, misjärel on näha, mis sagedustest konkreetne helilõik koosneb.



Joonis 4.6. Audacity-s signaali uurimisvõimalused

Helisämplite salvestamine

Kui esimesed katsed on osutunud edukaks, tuleb süsteemi testida ka komplekssemate helidega. Tavaolukordades ei ole üldiselt müraallikaks puhast siinust emiteeriv seade vaid palju laiema müraspektriga. Seega huvitavad meid helid päris elust, mitte niivõrd virtuaalsest signaaligeneraatorist tulevad toonid. Kuna antud töös on vajaminevad seadmed juba kasutusel, siis saab neid suurepäraselt rakendada ka erinevatest müraallikatest tulevate helide salvestamiseks.

Helisämplite ehk näidiste salvestamiseks kasutan sama mikrofoni SM58, mis mõõtmisel ning helikaarti. Salvestatavad helid on töötav sõiduauto bensiinimootor, suruõhu kompressor, murutraktori mootor, köögikubu ja akutrell. Hiljem taasesitatakse *sämpleid* primaarvaljuhääldi kaudu, mis imiteerib müraallikat.

Salvestamine toimub monofooniliselt diskreetimissagedusega 44100 Hz, ehk analoog signaal konverteeritakse digitaalseks võttes mõõdiseid 44100 korda sekundis.

Joonis 4.7. Müraallikate helitugevuse mõõtmine ja *sämplite* salvestamine

4.1 Seadmete valiku põhjendus

Toru valik

Mudel realiseeritakse PVC toru põhjal, kuna heli käitumine torus on ennustatav. Boonuseks on ka konstruktsiooni odav maksumus. Toru otsa kinnitatud kolmik on 45 kraadise nurgaga ning vajalik sekundaarse heliallika kinnitamiseks. Toru pikkuseks on 1600 mm, ning kolmikliitmik lisab konstruktsiooni pikkusele veel 250 mm. Kusjuures torude vahelise ühenduse ülekate on 50 mm. Seega on toru kogupikkus 1800 mm. Vajaduse korral on võimalik mudelit torumuhvi abil toru pikendada.

Toru suurus määrab omavõnkesageduse ehk resonantsi. Seisulained tekivad toru otste peegelduste tõttu kui helilained ühtivad toru pikkusega. Kusjuures peegeldavad nii toru kinnine kui ka lahtine ots. Selleks peab lainepikkus vastama toru resonantssagedusele. Sellisel juhul saadakse suure amplituudiga ehk tugev helilaine. Ühest otsast avatud toru resonantssagedus on arvutatav järgenvalt:

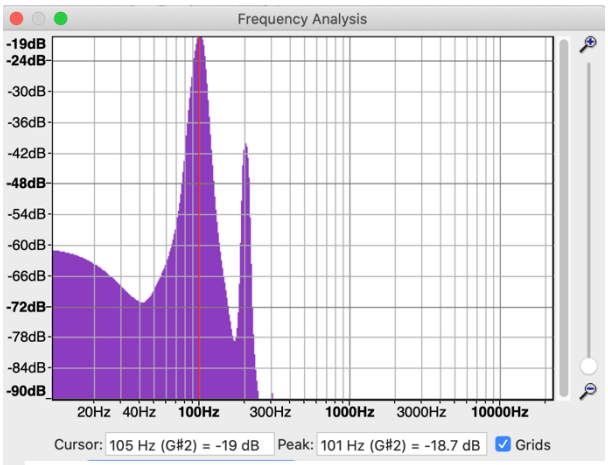
$$\lambda = \frac{4L}{n}$$, kus n=1; 3; 5...

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{nc}{4L}$$

Ühest otsast avatud pika toru esimene harmoonik ehk põhitoon on seega:

$$f = \frac{nc}{4L} = \frac{1 \cdot 337}{4 \cdot 1{,}6} = 52{,}7\ Hz$$

Kontrolliti arvutuse paikapidavust ka katseliselt. Salvestastati heli, mis tekib kui toru ühe otsa vastu käega lüüa. Nagu spektrogrammilt näha, domineerib sagedus 105 Hz, ning selle teine harmoonik 210 Hz. Teadupoolest on kahest otsast avatud toru resonants-sagedus kaks korda suurem [1].
Sellega on teooria ja praktika vaheline seos tõestatud.



Joonis 4.8. Toru resonantssageduse spekter

Valjuhääldi valik

Valjuhääldina on kasutusel identne paar Pioneer TS-H1341 autokõlareid. Tegemist on valjuhäälditega, mille madal 4 oomine takistus ja võimsus 120 W võimaldavad katset läbi viia ka kõrgetel detsibellidel. Valjuhääldi läbimõõt on 130mm ning membraanil 110mm. Valjuhääldi membraani ja PVC toru diameeter on valitud nii, et need ühtiks. Valjuhäälditel on fikseeritud toru avade suhtes selliselt, et heli ei leviks ümbritsevasse ruumi, vaid liiguks otse torusse. Katseseadeldise ehitamisel ilmnes juhtumisi, et konkreetseid valjuhäältdeid on võimalik toru külge kinnitada ühtegi täiendavat kinnitusvahendit kasutamata. Kuigi heli levib otse torusse, lekib osa heli siiski ka valjuhääldi avatud tagaosa kaudu ruumi. Seda annaks vähendada, kui ümbritseda kõlar helisummutavate materjalidega. Esialgu seda siiski ei tehta.

Tabel 4.2. Valjuhääldi parameetrid

Parameeter	**Väärtus**
Maksimaalne akustiline võimsus	120 W
Nimivõimsus	30 W
Takistus	4 Ω
Tundlikkus	90 dB/W 1m kauguselt
Sagedusvahemik	40 - 30000 Hz
Mass	1,33 kg
Läbimõõt	130 mm

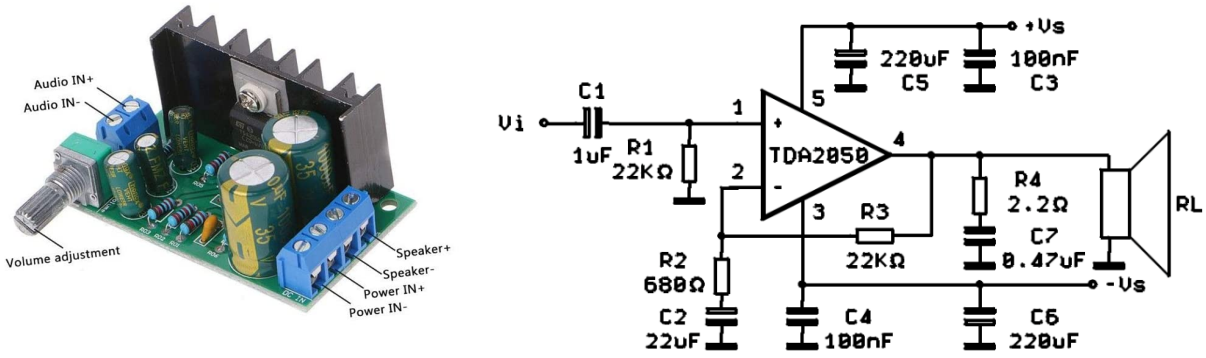
Joonis 4.9. Pioneer TS-H1341 kõlarid

Võimendi valik

Kuigi kõlarid töötavad ka võimendita, on nendest tulev heli võrdlemisi vaikne. Võimendi eesmärk on seega signaali võimendada. Võimendi valikul tuleb lähtuda kõlari parameetritest: 4 oomisest takistusest ja 30 vatisest nimivõimsusest. Algne plaan oli võimendi ise MOSFET-i põhjal ehitada makettplaadile. Kuna aga kõlarite võimsus on võrdlemisi suur, siis selliselt suurt võimendust ei saavutaks. Teine probleem oleks ilmnenud kuumenemisega, mistõttu soojusvaheti on hädavajalik. Kõiki komponente ükshaaval ostes oleks aga võimendi maksumus kujunenud suuremaks kui osta kohe „valmislahendus". Juhendajaga konsulteerimise tulemusena sai otsustatud TDA2050 operatsioonvõimendi baasil võimendi kasuks. See on võrdlemisi levinud ning ka taskukohane lahendus. Sobiv seade valiti välja ja telliti *Amazoni* veebipoest. [12] Operatsioonvõimendi on oma olemuselt diferentsiaalvõimendi, võimendades sisendsignaalide vahet. Konkreetse seadme puhul saab kõlarite võimsust kindlas vahemikus reguleerida. Seadmel on 4 sisendit ja 2 väljundit. Sisendite külge ühendatakse toiteploki pluss ja miinus juhe ning heliallika ühendamiseks AUX kaabli kaks juhet. Väljundisse ühendatakse valjuhääldi pluss ja miinus juhtmed. Kasutatavad juhtmed peavad olema piisavalt pikad aga mitte ka üledimensioneeritud.

Tabel 3.4. TDA2050 võimendi tehnilised andmed

Parameeter	**Väärtus**
Toitepinge	+- 4,5...25 VDC
Väljundvõimsus	35 W
Muusika võimsus	50 W
Lühisvool	5 A



Joonis 4.10. TDA2050 võimendi [12] ja skeem [17]

Toiteploki valik

Võimendid vajavad töötamiseks 12-24 V alalisvoolu toiteallikat. Allika vool eeldusel, et võimendi võimsus on 50 W on võimalik välja arvutada:

$$P = IU \tag{4.1}$$

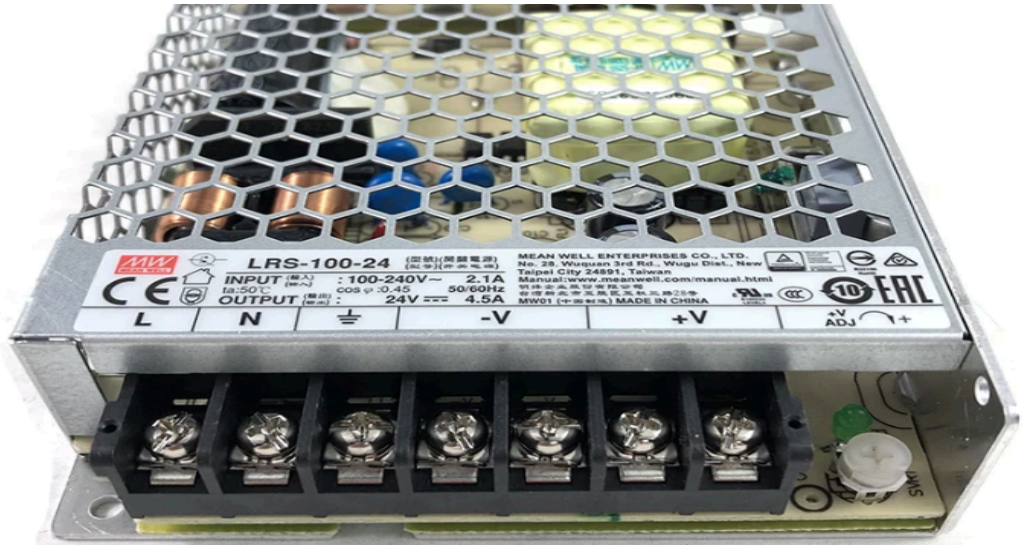
$$P = IU \Rightarrow I = \frac{P}{U} = \frac{50}{24} = 2{,}083A$$

Nende parameetrite parameetrite põhjal välja sobiva toiteploki. Kuna võimendeid on kaks tükki, on vaja kahekordset rehkendatud voolutugevust. Väljavalituks osutus isend, mille väljundpinge on 24 V, võimsus 108 W ning maksimaalne väljundvool 4,5 A. Lisaks on võimalik väljundpinget vahemikus 22...30 V reguleerida. [13]

Tabel 4.5. Toiteplokk MeanWell LRS-100-24 tehnilised andmed

Parameeter	**Väärtus**
Sisendpinge	230 VAC
Väljundpinge	22...30 VDC
Väljundvõimsus	108 W
Väljundvoolu vahemik	0...4,5 A
Efektiivsus	90%

Positiivne on ka see, et toiteplokk on varustatud indikaatortulega. Tänu sellele on visuaalselt võimalik tuvastada, kui juhtmed on pingestatud. Toiteploki sisendisse tuleb seinakontaktist 230 V vahelduvvool. Kuna toiteplokil puudub sisse lülitamiseks lüliti, ühendati turvalisuse ja kasutamismugavuse eesmärgil sisendi külge lülitiga varustatud juhtme. Väljundpinge seadistatakse voltmeetri abil 24 V peale.



Joonis 4.11. Töös kasutatava toiteploki skeem

Helikaardi valik

Helikaarti on vaja selleks, et helisignaale võtta vastu ning välja saata. Helikaardi sisendisse ühendatakse mikrofonid ning väljundisse võimendid. Seade on ise ühendatud USB kaabliga arvuti külge. Antud ülesande sooritamiseks on vaja vähemalt kahe kanali ehk sisendiga helikaarti. Sellele kriteeriumile vastab näiteks üldlevinud *Focusrite Scarlett 2i2*, mida hakatakse kasutama ka antud töös. Antud isendil on esiküljel kaks sisendit, kuhu saab ühendada XLR kaabliga mikrofonid. Samuti saab nende võimendust reguleerida. Seadme tagaküljel kaks 6.1 mm pulkjuhtme pesaga, mille signaali tugevust saab muuta esiküljel nupuga „Monitor". Tootja sõnul on helikaardil „*super-low latency*" ehk väike hilistumine, jäädes 2,74 ms juurde. Lisaks on võimalik anda vajadusel kondensaatormikrofonidele 48 V fantoomtoidet.

Tabel 4.6. Focusrite Scarlett 2i2 tehnilised andmed

Parameeter	**Väärtus**
Mikrofoni sisendi sagedusvahemik	20 Hz...20 kHz
Mikrofoni sisendidünaamiline ulatus	111 dB (A-korrigeeritud)
Mikrofoni sisendi võimendus ulatus	56 dB
Latency	2,74 ms
Toetatud diskreetimissagedus	44,1/ 48/ 88.2/ 96/ 176,4/ 192 kHz
Väljundi dünaamiline ulatus	108 dB

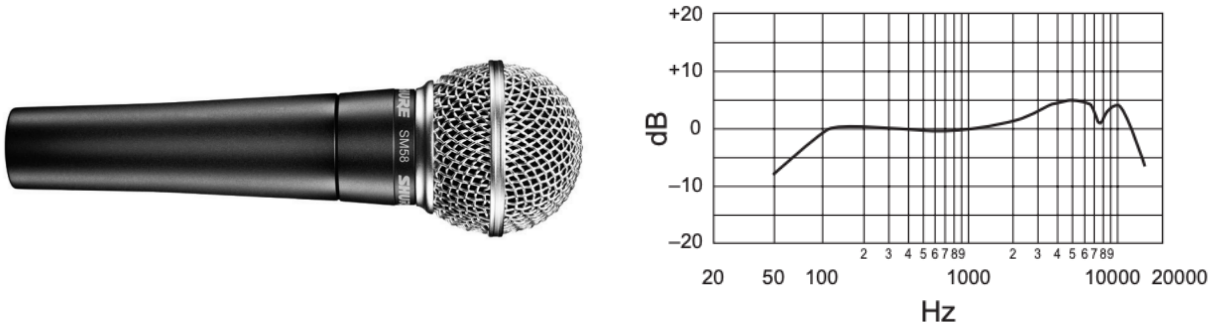
Joonis 4.12. Focusrite Scarlett 2i2 helikaart [14]

Mikrofoni valik

Mikrofon on ANC tehnoloogias olulisel kohal, kuna kasutatakse ümbritseva müra „kuulamisel" ja mõõtmisel. Antud lahenduses on kasutusel kaks identset dünaamilist mikrofoni *Shure* SM58. Tegemist on helitehnikas üldlevinud vokaalimikrofoniga, mis on tuntud oma töökindluse poolest. Mikrofonilt saab lihtsasti eemaldada metallist kupli, mis suurendab signaali tundlikkust. Samuti võimaldab filtri eemaldamine vähendada helilainete peegeldusi. Esimene mikrofon asetatakse primaar valjuhääldi ette, kus toimub müra mõõtmine. Teine mikrofon saab olema asetatud mikrofonistatiivil toru suu ette, kus mõõdetakse sekundaar valjuhääldi mõju.

Tabel 4.7. Shure SM58 tehnilised andmed

Parameeter	**Väärtus**
Tüüp	Dünaamiline
Sagedusvahemik	50...15000 Hz
Polaarsus	Cardoid
Tundlikus	-54,5 dBV/Pa (1,85 mV)
Näivtakistus	300 oomi
Pistik	XLR



Joonis 4.13. Shure SM58 ja tema tundlikkus sageduse suhtes. [16]

Efektiprotsessori valik

Selleks, et müraallikast tulevat helisignaali sekundaarkõlari abil vähendada on vaja tekitada faasinihe. Selleks tuleb kaks signaali omavahel ajaliselt nihkesse viia. Üks võimalik lahendus on kasutada *delay* efektiprotsessorit, millega saab tekitada ajalise nihke kahe signaali vahel. Sellised efektipedaalid on levinud elektrikitarristide seas, kuid rakendusvaldkondade osas loob piire vaid ettekujutusvõime. Antud ülesande puhul on seadme sisendiks müraallika juures paiknev mikrofon, ning väljundiks võimendi, mis on ühendatud vastumüra allika külge. Kuigi pedaal pakub signaali töötlemiseks mitmeid võimalusi, kasutame vaid mõningaid sätteid.

Tabel 4.8. Boss DD-6 tehnilised andmed

Parameeter	**Väärtus**
Hilistusaeg	1 ms kuni 5,2 s
Toiteallikas	9 VDC patarei
Voolutarve	55 mA
1. Lüliti	Lülitab seadme sisse ja välja
2. Sisend	Signaal mikrofonist sisse
3. Väljund	(Töödeldud) signaal võimendisse.
4. Efekti helitase	Reguleerib efekti helitaset
5. Tagasimängu korduste arv	Reguleerib hilistatud signaali kordusete arvu
6. Hilistus aeg	Reguleerib signaali hilistust vastavalt režiimile kindlas vahemikus
7. Režiimi valik	Reguleeritav hilistusaeg 80-2600 ms

Joonis 4.14. BOSS DD-6 efektiprotsessor [19]

Efekti helitase (4) tuleb keerata maksimumi, vältimaks puhta helisignaali jõudmist väljundisse. Tagasimängu korduste arv (5) tuleb keerata miinimumi, kuna soovime vältida helisämplite korduma hakkamist. Režiim (7) millega antud ülesandes toimetatakse on 80 ms. See tähendab, et nupuga 6 *delay time* saab muuta signaali hilistumist vahemikus 1 kuni 80 ms.

Müramõõturi valik

Müra mõõtmiseks on kasutusel instituudist saadud müramõõtur TES 52. Tegemist on usaldusväärse sertifitseeritud seadmega. Seadmel on võimalik valida sobiv helitaseme vahemik. Mõõtmisi saab sooritada nii A kui C-korrektsiooniga. A-korrektsiooniga mõõdetakse üldist müra ning C-korrektsiooniga sooritatakse üldiselt akustiliste materjalide mõõtmisi. Ekraanile kuvatakse näit iga sekundi tagant. Tehnilised andmed on saadud mõõteriistaga kaasas olevast juhendist.

Tabel 4.9. Müramõõturi TES 52 tehnilised andmed

Parameeter	**Väärtus**
Mõõtepiirkond	26...128dB
Sageduspiirkond	31,5Hz...8kHz
Helinivoo eraldusvõime	0,1 dB
Lineaarsus	60 dB
Sämpling	125ms
Mõõte vahemikud	26...80 dB 40...100 dB 60...120dB 30...90 dB 50...110 dB 70...130dB
Korrelatsioon	A- ja C-korrigeeritud (RMS)
Standardid	IC61672-1:2002 Class 2; IEC60651:1979 Type 2

Töös sooritatakse mõõtmisi vahemikuks 60...120dB A-korrelatsiooniga FAST režiimis.

Joonis 4.15. Müramõõtur TES 52

4.2 Katseplaan

Katsed viiakse läbi järgides katseplaani, ning toimuvad siseruumis. Mõõdetakse ära ruumi temperatuur, mille kaudu on võimalik leida heli levimiskiirus. Torumudel asetatakse laua peale. Toru otsa on kinnitatud müra allikas mis on juhtmetega ühendatud võimendi külge. Võimendi omakorda ühendatakse AUX juhtmega heliallika külge. Heliallikaks on arvutiprogrammis Audacity olev signaaligeneraator. Toru kolmikliitmiku külge on kinnitatud sekundaar heliallikas, mis ühendatakse võimendi kaudu helikaardiga. Helikaart ühendatakse USB kaabliga arvuti külge. Järgmiseks tuleb paika seada mikrofonid. Primaar valjuhääldi vahetuslähedusse paigutatakse mikrofon, mis hakkab mõõtma müra. Teine mikrofon asetatakse statiivil avatud torusuu ette. Seejärel ühendatakse mikrofonid XLR juhtmega helikaarti, vastavalt kanalitesse 1 ja 2.

Arvutis käivitatakse helitöötlusprogramm Audacity. Võimendite toiteplokk ühendatakse vooluvõrku ning lülitatakse sisse. Mõlema võimendi võimsus reguleeritakse potentsiomeetriga paika. Mikrofonide tundlikkus keeratakse helikaardil indikaatorite abil parajaks. On oluline, et signaalid poleks liiga vaiksed ega ka ülevõimendatud. Seejärel saab alustada esimeste kalibreerimist võimaldavate katsete tegemist.

Audacity signaaligeneraatorist lastakse signaal primaar valjuhääldisse. Sekundaar mikrofoni abil mõõdetakse helitugevus katse alguses ning 30 sekundit jooksul pärast aktiiv-mürasummutust teostava valjuhääldi sisse lülitamist. Saadud tulemused kantakse mõõtetulemuste tabelisse, mida hiljem analüüsitakse. Mõõtmiste läbiviimiseks kasutatakse instituudist saadud kalibreeritud müramõõturit. Sellega tagatakse mõõtmiste täpsus ja usaldusväärsus. Samuti on müramõõturit võimalik kasutada referentsina hindamaks mikrofoniga võetud mõõdiste pädevust.

Allpool kirjeldatud katsed viiakse läbi kaks korda: esmalt mürasignaali ajalise hilistamisega ning seejärel polaarsuse muutmisega.

Katse 1

Virtuaalsest signaaligeneraatorist käivitatakse ükshaaval siinustoone sagedustega 100, 250, 440, 750, 1000 ja 1500 Hz. Oluline on ära märkida, et sageduste helitugevus on erinev. Seetõttu tunduvad madalad sagedused vaiksemad kui kesksageduslikud. Vajadusel saab müraallika helitugevust helikaardil muuta. Enne igat katset teostatakse helitugevuse mõõtmine. Katse järel võrreldakse aktiiv-mürasummutuse ja müraallika helitugevuste vahet ehk gradienti.

Katse 2

Kui katsed puhta siinus tooniga on edukalt läbitud siis järgneb komplekssemate helide uurimine. Selleks mängitakse Audacity signaaligeneraatorist valget, roosat ja pruuni müra. Selliste müra spektrisse (sagedusvahemikku) jäävad ka liiklushelid ning teised tehislikud mürad. Sisuliselt on tegemist kohinate, undamiste või mõne muu monotoonsete heliga, mida peetakse häirivaks. Kuna need helid sisaldavad erineva sageduse ja tugevusega osasid on nende protsessimine märksa keerulisem. Siinkohal on oluline spektri põhjalik uurimine. Spektrogramm saadakse *Fourier* teisenduse kaudu programmist Audacity. Seejärel viiakse läbi katsed varasemalt salvestatud näidishelidega, mis imiteerivad erinevaid müraallikaid (automootor, kompressor, ventilaator)

Katse 3

Kui katsed tehismüraga osutusid edukaks siis proovitakse aktiiv-mürasummutust rakendada ka muusika mängimisel. Muusika koosneb pea kõik võimalikest heli parameetritest, õigemini nende segust. Erinevatel instrumentidel on kõigil oma spekter, mis sulanduvad omavahel üheks. Niivõrd keerulise ülesande puhul on imekspandav, kui aktiiv-mürasummutus suudab helitugevustee vähendamisele soovitud mõju avaldada. Katseid viiakse läbi erinevas stiilis muusikateostega, nendeks on klassikaline, rokk- ja elektrooniline muusika.

Katse 4

Ühtlasi viiakse läbi katse, kus aktiiv-mürasummutus saavutatakse tänu kahe valjuhääldi vahelisele kaugusele. Mõlemad valjuhääldid saavad signaaligeneraatorist ühesuguse siinustooni, mis vastab sagedusele 100 Hz. Teoorias peaks sellel sagedusel kohtuma kahe siinuslaine amplituud ja nõgu, mistõttu toimub destruktiivne interferents. Sekundaarvaljuhääldi võimendi abil saab vajadusel reguleerida vastumüra helitugevust.

Katse 5

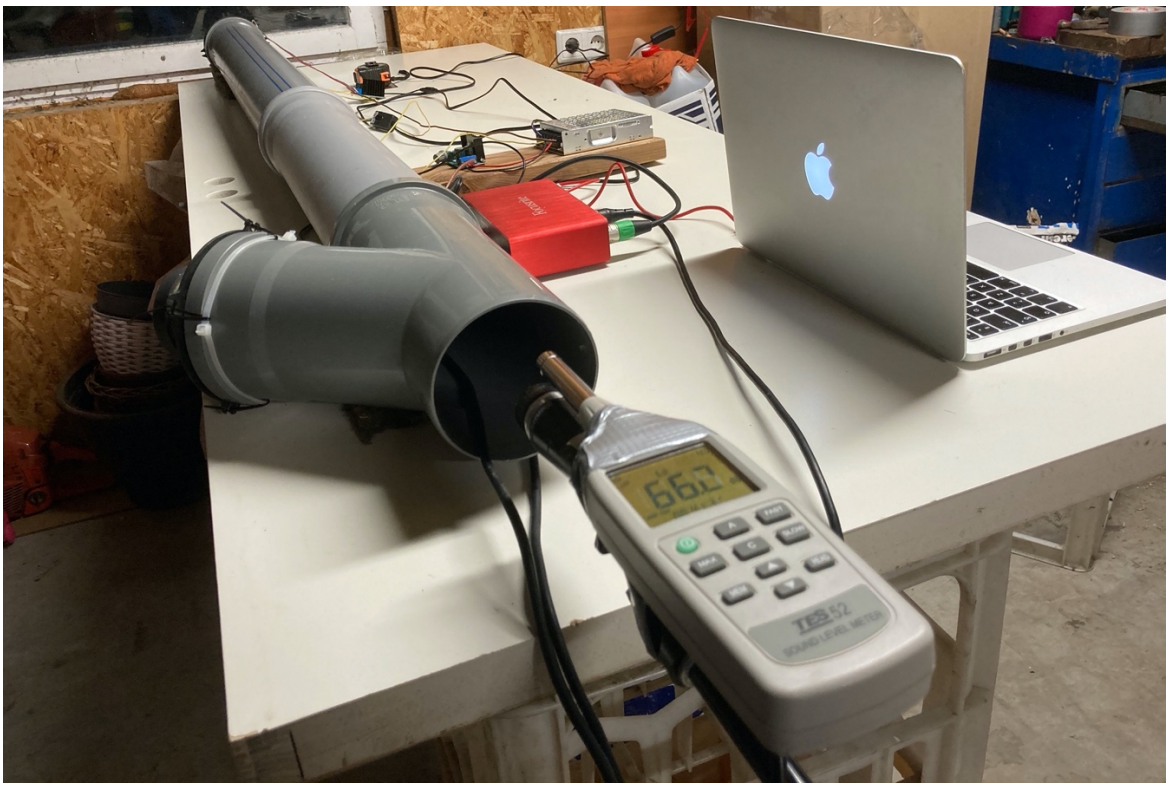
Parema referentsi saamiseks ning hinnangute andmiseks aktiiv-mürasummutuse toimivuse kohta viiakse läbi üks katse ka passiv-mürasummutusega. Selleks suletakse lahtine toru ots tihedalt helineelduva materjaliga ning teostatakse pruuni müra helitugevuse mõõtmine.

4.3 Katse läbiviimine

Katsed esimese meetodiga viidi läbi 5. mail siseruumis temperatuuriga 10℃. Sellest tulenevalt on võimalik vastavalt valemile 1.3 leida heli levimiskiirus:

$$c = 331 + 0{,}6t \;=\; 331 \;+\; 0{,}6 \cdot 10 = \; 337\, m/s \qquad (4.2)$$

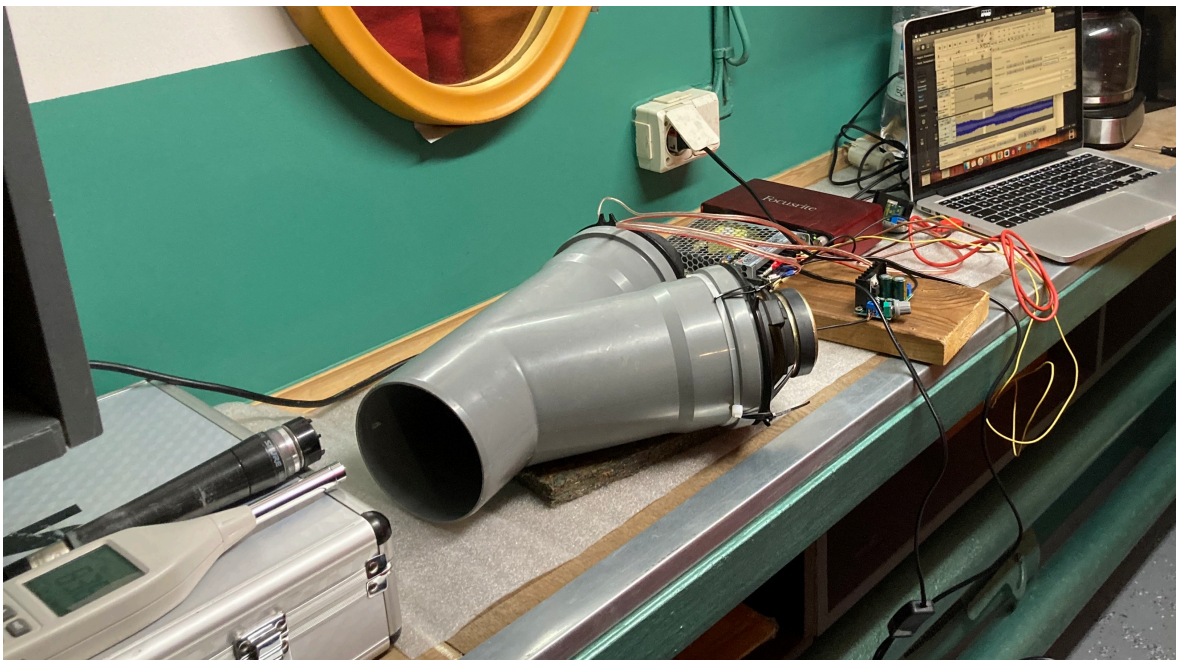
Seadistamise käigus ilmnes, et väga tugevate ja äkilise iseloomuga vilinate korral võib sekundaar valjuhääldi õhuosakeste tugevate liikumiste tõttu toru küljest ära lennata. Seetõttu sai see sinna kimbusidemetega kinnitatud. Vilistamine oli tingitud mikrofon-valjuhääldi positiivsest tagasisidest. Selle vältimiseks tuli mikrofoni võimendus keerata minimaalseks. Katsed erinevatel sagedustel siinustoonide ja industriaalmüraga mõjusid kuulmisele väsitavalt. Töö autor sai omal nahal tunda, miks on 120 dB suurune helitugevus valulävi piiriks. Katsetused said viperustest hoolimata sooritatud ning tulemused on nähtavad alajaotistes 4.4.1 ja 4.4.2.



Joonis 4.16. Katse aktiiv-mürasummutus süsteemiga hilistamismeetodil

Katsed muudetud polaarsuse meetodil viidi läbi 10. mail samuti siseruumis õhutemperatuuriga 10℃. Katseseadeldise küljest on eemaldatud pikk toru, ning valjuhääldid paiknevad kohakuti. Lisaks on sekundaarvaljuhääldi külge ühendatud juhtmed omavahel ümber vahetatud, mille tulemusel saadakse muudetud polaarsus. Kui eelmisel meetodil tuli sobiv signaali hilistumine seadistada käsitsi, siis polaarsuse pööramisel saadud on vastumüra allika signaal kohe poolperioodi võrra hilistunud.

Signaal tuleb mõlemasse valjuhääldisse läbi helikaardi Audacity signaaligeneraatorist. Antud lahenduses kasutatakse mikrofoni vaid mõõtmise eesmärgil. Katse alguses on sekundaarvaljuhääldi võimendi võimendus keeratud maha. Mõõdetakse müraallika helitaset. Seejärel suurendatakse vastumüraallika võimendust kuni saavutatakse soovitud tulemus. Teoreetiliselt peaks kõige optimaalsem võimendus olema võrdne müraallika võimendusega. Tulemused salvestatakse programmi Audacity. Samuti kasutatakse referentsina ka müramõõturit. Tulemused on väljatoodud alajaotistes 4.4.1, 4.4.2 ja 4.4.3.



Joonis 4.17 Katse sekundaar valjuhääldi muudetud polaarsuse meetodil

11. mail viidi läbi kaks katset. Esimese puhul toimus helilainete summutamine kahe valjuhääldi vahelise kaugusega. Mõlemast mängiti 100 Hz siinustooni, mille pool lainepikkust vastas kõlarite vahele jääva vahemaa omale. Tulemused on nähtavad alajaotises 4.4.4.

Samal päeval viidi läbi ka teine katse passiivse mürasummutuse kohta. Toru avatud otsa tekitati poroloonist „kork", mis takistas füüsiliselt heli levikut. Tulemused on näha alajaotises 4.4.5.

4.4 Katseandmete töötlus

Kasutades müramõõturit ja sekundaar mikrofoni fikseeritakse näit enne ja pärast katset ning kantakse tabelisse. Protseduuri korratakse erinevate sageduste, mürade ja muusikapaladega kaks korda: esmalt signaali hilistamise ning teiseks polaarsuse muutmisega. Katseandmete põhjal koostatakse tulemuste visualiseerimiseks graafikud. Saadud tulemuste võrdlemise põhjal selgitatakse välja, kas katseseadeldis täitis oma eesmärgi ning milline meetod oli efektiivsem. Lisaks helitasemetele detsibellides konverteeritakse need hiljem ümber helirõhuks, mida mõõdetakse paskalites. Helitugevus L_0 on helirõhu *p* logaritmiline väljendusviis:

$$L_0 = 20log_{10}\frac{p}{p_0} \tag{4.3}$$

Kui soovime avaldada valemist helirõhku *p:*

Teades, et $y = \log_a x$ ja $x = a^y$ siis:

$$\frac{p}{p_0} = 10^{L_0/20} \implies p = 10^{L_0/20} \cdot p_0 \tag{4.4}$$

Helirõhu vahe Δp leitakse järgnevalt:

$$\Delta p = p_{enne} - p_{pärast} \tag{4.5}$$

Katsetulemuste tabelis tuuakse lisaks helitugevustele detsibellides välja ka arvutuslik helitasemete vahe paskalites, mis saadakse ülal toodud valemite rakendamisel Excelis.

Kui mõõdetav müra on muutliku iseloomuga ja indikaatori näidud muutuvad pidevalt siis tuleb võtta näitudest keskmine ning lähtuda sellest.

4.4.1 Katse 1. Siinustoonid

Esimese katse käigus lasti primaar valjuhääldist signaaligeneraatori poolt tekitatud siinustoone. Esmalt prooviti aktiivmürasummutust teostada signaali hilistamisega ning hiljem korrati katset ümberpööratud valjuhääldi polaarsusega.

Tabel 4.10. Siinustoonide summutamine signaali hilistamisega katsetulemused

Katse nr.	Sagedus (Hz)	Helitase enne (dB)	Helitase pärast (dB)	Helitasemete vahe (dB)	Helirõhu vahe (μPa)
1	100	91,2	89,0	2,2	162479
2	250	103,2	102,9	0,3	981428
3	440	104,6	103,8	1,1	298854
4	750	117,0	113,0	4,0	5225243
5	1000	105,7	104,5	1,2	497441
6	1500	104,5	102,6	1,9	659682

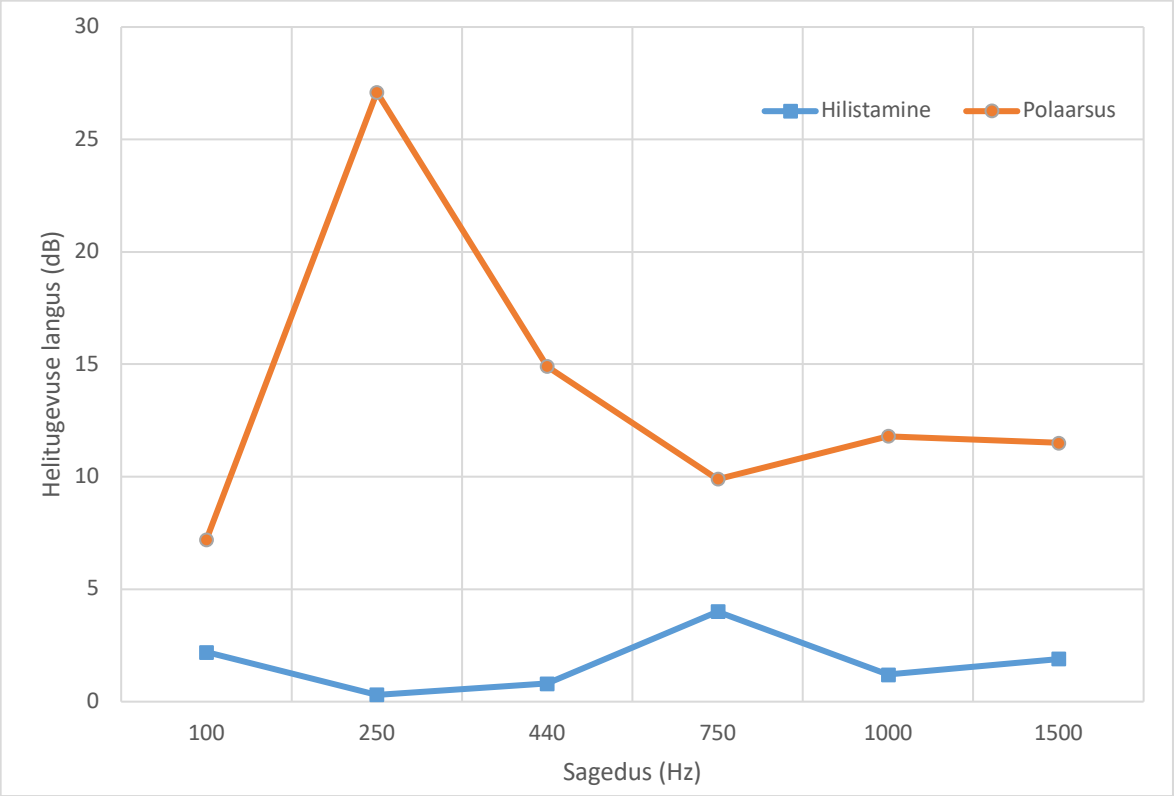
Aktiiv-mürasummutus signaali hilistamisega sekundaarvaljuhääldi poolt on kindlatel sagedustel võimalik. Mõningatel sagedustel on tulemused paremini märgatavad ja ka kõrvaga kuuldavad. Graafilised tulemused on välja toodud lisas 1.

Tabel 4.11. Siinustoonide summutamine valjuhääldi muudetud polaarsusega katsetulemused

Katse nr.	Sagedus (Hz)	Helitase enne (dB)	Helitase pärast (dB)	Helitasemete vahe (dB)	Helirõhu vahe (μPa)
1	100	85,3	78,1	7,2	207449
2	250	91,7	64,6	27,1	735218
3	440	90,5	75,6	14,9	549418
4	750	91,0	81,1	9,9	482624
5	1000	92,8	81,0	11,8	648627
6	1500	88,4	76,9	11,5	386085

Katse muudetud polaarsuse meetodil oli vägagi edukas. Võrreldes eelmise meetodiga saavutati kordades paremad tulemused kõikidel sagedustel. Graafilised tulemused on välja toodud lisas 2.

Parema võrdluse saamiseks on kahe meetodi tulemused kantud järgnevale graafikule.



Joonis 4.19 Võrdlus helitugevuse languses erinevate sagedustega siinustoonidele ANC rakendamisel signaali hilistamise vs polaarsuse muutmise teel

Tulemustest on selgelt näha, et siinustoonide puhul andis paremad tulemused valjuhääldi ümberpööratud polaarsusega meetod. Kusjuures 250 Hz puhul, kus signaali hilistamisega saadud helitugevuse langus on vaevumärgatav andis muudetud polaarsus vastupidiselt parima tulemuse jäädes 27,1 dB juurde.

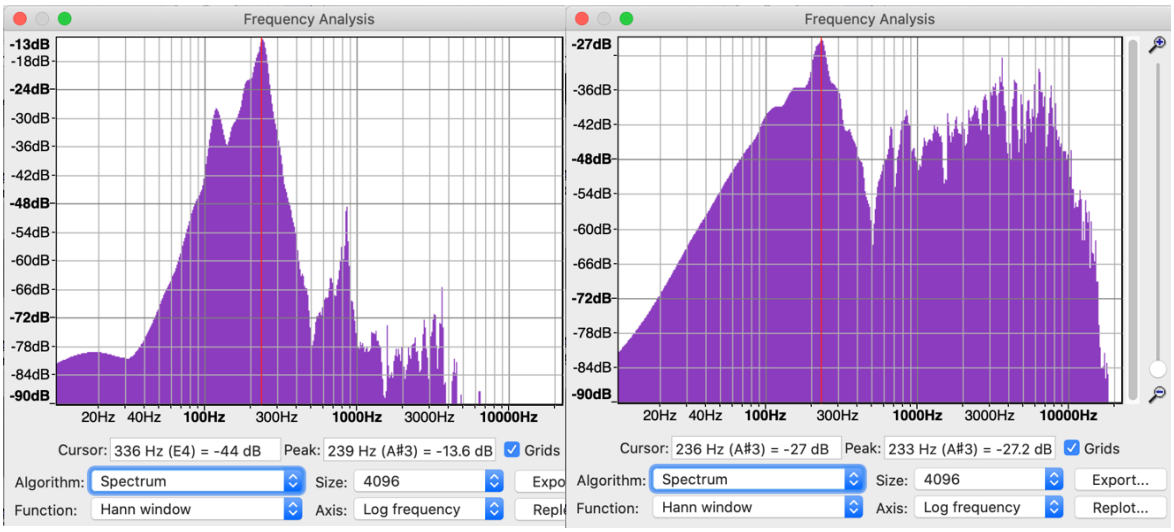
4.4.2 Katse 2. Tehislik müra

Teine katse viidi läbi mürageneraatorist ja tehislikest müraallikatest tulevate müradega.

Tabel 4.12. Erinevate müraallikate summutamine signaali hilistamismeetodil

Katse nr.	Müraallikas	Müratase enne (dB)	Müratase pärast (dB)	Müratasemete vahe (dB)	Helirõhu vahe (μPa)
1.	Roosa müra	88,4	88,1	0,3	17859
2.	Pruun müra	86,1	85,7	0,4	18168
3.	Valge müra	87,4	87,3	0,1	5366
4.	Auto mootor	83,1	82,8	0,3	9702
5.	Kompressor	101,7	99,8	0,9	477898
6.	Ventilatsioon	85,0	83,9	1,1	42306
7.	Akutrell	81,4	81, 2	0,2	5348
8.	Murutraktor	92,3	92,1	0,2	18761

Katse delay efektiprotsessoriga signaali ajalise viite tekitamise meetodiga ei olnud tõhus. Helitugevuse langused on vaevumärgatavad või sisuliselt olematud. Parim tulemus oli ventilatsiooni müra summutamisel ning halvim valge müra puhul. Kahe nimetatud müra spektrogrammide (vt joonis 4.21) uurimisel on näha, et ventilatsiooni müra spekter on oluliselt kitsam kui valge müra oma.

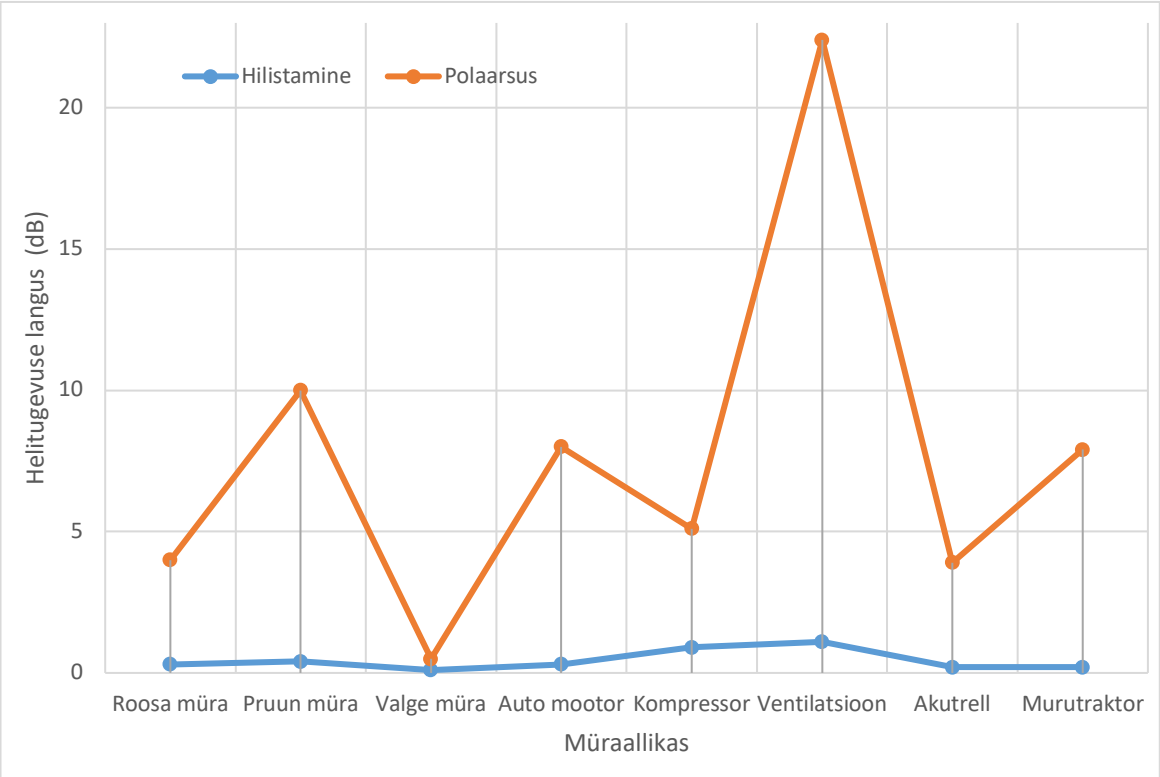


Joonis 4.21. Ventilatsiooni ja valge müra spektrogramm

Tabel 4.12. Erinevate müraallikate summutamine muudetud polaarsusega

Katse nr.	Müraallikas	Müratase enne (dB)	Müratase pärast (dB)	Müratasemete vahe (dB)	Helirõhu vahe (μPa)
1.	Roosa müra	103,5	99,5	4,0	1104349
2.	Pruun müra	75,3	65,3	10,0	79605
3.	Valge müra	85,1	84,6	0,5	20125
4.	Auto mootor	81,1	73,1	8,0	136630
5.	Kompressor	91,0	85,9	5,1	315142
6.	Ventilatsioon	84,2	61,8	22,4	299756
7.	Akutrell	88,2	84,3	3,9	185961
8.	Murutraktor	86,3	78,4	7,9	246723

Katse muudetud polaarsuse meetodil oli edukas ning pea kõigi müraallikate puhul saavutati märkimisväärne helitugevuse langus. Parimad tulemused on nähtavasti ventilatsiooni müra summutamisel, kus helitase vähenes tervenisti 22,4 dB võrra. Halvim tulemus oli valge müra summutamisel, kus sisulist ega kõrvaga tajutavat muutust ei esinenud. Graafilised tulemused on välja toodud lisas 3.



Joonis 4.19 Võrdlus helitugevuse languses erinevatele müradele ANC rakendamisel signaali hilistamise ja polaarsuse muutmise teel

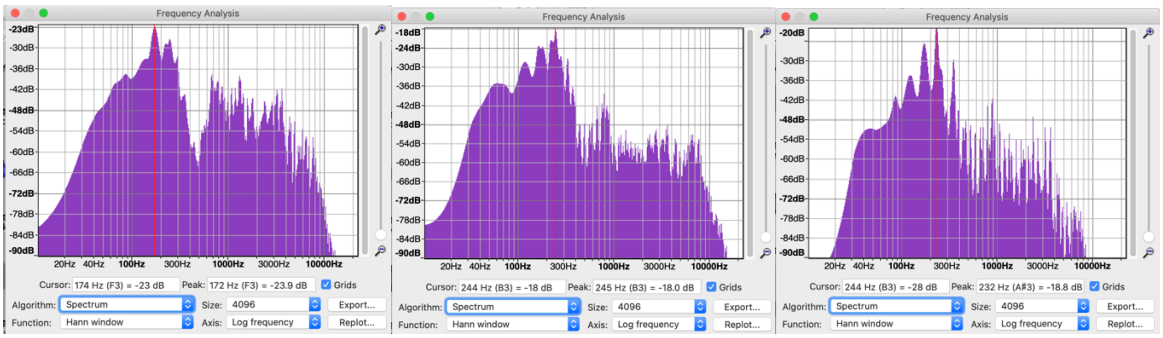
4.4.3. Katse 3. Muusika

Kolmandas katses mängiti läbi primaarvaljuhääldi kolme erinevas stiilis muusikateost. Kuna katsed *delay* efektiprotsessoriga ei osutunud eelmises katsevoorus edukaks, on selles osas katse läbiviidud ainult muudetud polaarsusega sekundaarvaljuhääldi mudelil.

Tabel 4.13. Polaarsuse muutmisega saavutatud ANC katsetulemused

Katse nr.	Muusika žanr	Helitase enne (dB)	Helitase pärast (dB)	Helitasemete vahe (dB)	Helirõhu vahe (μPa)
1.	Rokk	101,2	96,4	4,8	974920
2.	Elektrooniline	104,3	104,0	1,3	456105
3.	Klassikaline	98,9	97,9	1,7	313226

Nagu tulemustest selgub, siis kõige parem tulemus saavutati antud katses aktiiv-mürasummutuse rakendamisel rokkmuusika puhul. Spektrogrammide lähemal uurimisel ilmneb, et antud rokkmuusika näitel domineerib enim 174 Hz, samas kui ülejäänud kahe näite puhul on see väärtus 244 Hz ümber. Samuti on näha, kui laiaulatuslikust spektrist muusika koosneb. Mõneti üllatav on ka asjaolu, et korduva iseloomuga elektroonilise muusika puhul ei olnud sisuliselt helitugevuse langust märgata, kuigi oleks seda eeldanud. Üldiselt võib väita, et muusika puhul aktiiv-mürasummutuse rakendamine on küllalti ebaefektiivne, ent mõnel juhul siiski teostatav.



Joonis 4.23. Rokk-, elektroonilise ja klassikalise muusika *sämplite* spektrogrammid

4.4.4 Katse 4. Kahe valjuhääldi vaheline kaugus

Selles katses teostati aktiiv-mürasummutust kahe valjuhääldi vahelise distantsiga. Torumudeli pikkusest tulenevalt on kahe valjuhääldi vaheline kaugus 1,7 meetrit. See vastab 100Hz sageduse poolele lainepikkusele. Mõlemast valjuhääldist lasti ühesugust sama valjudusega puhast tooni sagedusega 100 Hz.

Tabel 4.14. Aktiiv-mürasummutus müraallikate vahelise distantsiga

Katse nr.	Sagedus (Hz)	Helitase enne (dB)	Helitase pärast (dB)	Helitasemete vahe (dB)	Helirõhu vahe (μPa)
1.	100	90,1	82,4	7,7	376127

Katse osutus edukaks ning tõestas, et tõepoolest selline meetod töötab hästi. Kusjuures helitugevuse langus 7,7 dB on märgatavalt parem tulemus kui katses 1 saavutatud tulemused signaali hilistamise (vt tabel 4.4.1) ja polaarsuse muutmise (vt tabel 4.4.2) meetodil.

4.4.5. Katse 5. Passiivne mürasummutus

Olles testinud ja veendunud aktiiv-mürasummutuse võimalikkuses viidi läbi ka katse, kus teostati toru passiv-mürasummutust. Selle jaoks sulgeti toru lahtine ots tihedalt poroolooniga, mis on teatavasti suure helineelduvusega materjal. Seejärel lasti müraallikast Audacity signaaligeneraatori poolt tekitatud pruuni müra ja teostati mõõtmine.

Tabel 4.15. Pruuni müra summutamine passiivse mürasummutusega katse tulemused

Katse nr.	Müra	Helitase enne (dB)	Helitase pärast (dB)	Helitasemete vahe (dB)	Helirõhu vahe (μPa)
1.	Pruun müra	94,1	73,7	20,4	917146

Pruuni müra aktiiv-mürasummutus polaarsuse muutmise meetodil saadi tulemuseks 10dB helitugevuse langus. Antud katse tõestab, et helide summutamiseks on kõige efektiivsem meetod siiski passiivne mürasummutus, ehk füüsiline helileviku tõkestamine. Selline tulemus ei tule siiski üllatusena vaid pigem konstateerib fakti.

4.5 Soovitused ja järeldused

Antud töö katselise osa tulemuste põhjal on võimalik teha mitmeid järeldusi.

1. Puhaste toonide puhul on võimalik aktiiv-mürasummutust saavutada ka signaali ajalise hilistamise kaudu.

2. Kui müraallika ja vastumüra allika (valjuhääldi) polaarsus ära muuta, on võimalik saavutada teatud mürade korral märkimisväärne helitaseme langus.

3. Kindla spektriga müra on lihtne analüüsida, mõõta ja korrigeerida.

4. Mida laiem on heli spekter, seda keerulisem on aktiiv-mürasummutust teostada.

5. Keerukamate helide aktiivseks müra summutamiseks tuleb rakendada teisi meetodeid. See eeldab vastavate algoritmide ja programmide koostamist, mis oleks suuteline väga lühikese aja jooksul genereerima sobiva vastumüra. Selleks tuleks teostada torus helilevimise hetkel FFT ehk *Fast Fourier Transformation*, mille tulemusel saadakse mikrofoni ajalisest signaalist sageduslik, ning seejärel teostada ka vastupidine (tagasi)teisendus 180 kraadise faasinihkega. See ülesanne ei ole paraku nii triviaalne kui esmapilgul tundub.

6. Aktiiv-mürasummutus süsteemi valel seadistamisel võib soovitud tulemus olla vastupidine ning helitase hoopis kasvab.

7. ANC paistab olema tõhusam madalsagedusliku müra summutamisel.

8. Müramõõturi ja mikrofoni mõõtetulemuste vahel oli komplekssemate mürade helitaseme languse hindamisel märgatavad erinevused. Näiteks kompressori müra mõõtmisel algul ja pärast pööratud polaarsusega valjuhääldi rakendamist ei näidanud müramõõtur suurt erinevust, kuigi Audacity programmi salvestatud tulemustest on vahe selgelt näha ja katse käigus ka kuulda. Kuigi mõlemad seadmed paiknesid kõrvuti, siis tundub et ka mõne sentimeetrine nihe võib mõjutada helitugevuste tajumist.

9. Passiv-mürasummutuse rakendamine näib olevat jätkuvalt tõhusaim meetod, kuid pole kõigil juhtudel siiski võimalik. Seega on aktiiv-mürasummutusel nii tänapäevastes lahendustes kui ka tulevikus kindel koht olemas.

KOKKUVÕTE

Aktiiv-mürasummutus põhineb lainete destruktiivse interferentsil. Kaks vastandfaasis olevat ühesugust signaali resulteeruvad nõrgema lainena, tühistades teineteist. Sellise nähtuse tekitamine on võimalik ruumiliselt (kahe valjuhääldi vahelise kaugusega) kui ka elektrooniliselt.

Praktilise töö eesmärk oli konstrueerida aktiiv-mürasummutustehnoloogial põhinev süsteem, mida rakendada toru mudelil. Selleks valiti esmalt vajaminevad komponendid: toru, valjuhääldi, võimendi, toiteplokk, mikrofon, helikaart, efektiprotsessor ja müramõõtur. Töötati välja kaks põhilist meetodit, mis võimaldasid aktiiv-mürasummutust teostada: nendeks olid signaali hilistamine ning valjuhääldi muudetud polaarsus. Töötati välja katseplaan, mille põhjal viidi mõlemal meetodil läbi katsed erinevate helidega. Alustati puhaste siinustoonidega, seejärel testiti laiema spektriga müra ning lõpuks ka muusikat. Lisaks salvestati tehislike müraallikate nagu auto mootor, ventilaator ja kompressor helinäidised, mida samuti katseseadeldise testimisel kasutati. Mõõtmised viidi läbi siseruumis, kasutades müramõõturit ja helikaardiga arvuti külge ühendatud mikrofoni. Tulemuste analüüsimisel leiti iga signaali helitugevuse langus detsibellides, aga ka uuritava heli spektrogramm.

Katsetulemuste põhjal võib väita, et mõlemad meetodid töötasid, ent oluliselt tõhusamad olid katsed ümberkeeratud polaarsusega katseseadeldisel. Parim tulemus saavutati 250 Hz siinustooni summutamisel, kus helitugevuse langus oli 27,1 dB. Samuti oli edukas katse ventilatsioonimüraga, kus saavutati 22,4 dB müarataseme langus. Kõige vähem andis tulemust laia sagedusspektri tõttu valge müra summutamine. Üllatuslikult osutus ka muusika aktiiv-mürasummutamine edukaks. Seega oleneb helitugevuse vähendamine ANC abil müra olemusest. Tulemuste põhjal võib järeldada, et aktiiv-mürasummutusel on enim mõju kitsa spektri ja madalamate sagedustega monotoonsete helide puhul.

Omandasin lõputöö tegemise käigus laiapõhjalised teadmised akustika valdkonnast. Töötasin läbi mitmed raamatud ja teadusartiklid. Süsteemi saaks kindlasti paremaks muuta, ent see eeldab vastava programmi koostamist. Ühtlasi sain kinnitust, et aktiiv-mürasummutusel on potentsiaali ka teistes rakendustes kui pelgalt kõrvaklappides.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

[1] Halliday/Resnick, Walker, *Füüsika põhikursus: õpik kõrgkoolile.* 1. köide, 2008

[2] E. Eskop, A. Sillart, Akustika ja helitehnika, 1988

[3] RIL 243-1-2007, *Hoonete akustiline projekteerimine*

[4] G. Ballou, *Handbook for sound engineers 4th edition*, 2008 (vaadatud 02.03.22)
https://books.google.ee/books?id=eh60Ue_K2QkC&q=%22loudspeaker%22electroacoustic%22transducer&pg=PA597&redir_esc=y#v=snippet&q=%22loudspeaker%22electroacoustic%22transducer&f=false

[5] L. Abo *Koduelektroonika käsiraamat*, 2007

[6] L. Abo *Elektroonika komponendid*, 1997

[7] Dünaamiline mikrofon: (vaadatud 04.03.22)
https://www.neumann.com/homestudio/en/what-is-a-dynamic-microphone

[8] Kondensaator mikrofon: (vaadatud 04.03.22)
https://www.neumann.com/homestudio/en/what-is-a-condenser-microphone

[9] Scherz P., Monk S. - *Practical Electronics for Inventors*, 4th Edition, 2016, pp. 956

[10] ANC baasil ventilatsiooni mürasummuti: (vaadatud 08.03.22)
http://www.technofirst.com/en/acta-ventilation-duct-noise-control/

[11] Aktiiv-mürasummutuse kasutamine autosalongis: (vaadatud 08.03.22)
https://www.electronicproducts.com/how-designers-can-harness-new-automotive-audio-technologies-for-active-noise-cancellation/#

[12] Võimendi TDA2050 (vaadatud 12.04.22)
https://www.amazon.com/dp/B07WXRNHYH?ref_=pe_2409890_445922140

[13] Toiteplokk võimendi jaoks (vaadatud 12.04.22)
https://www.diffusioneshop.com/en/index.php?controller=attachment&id_attachment=167

[14] Focusrite helikaart https://focusrite.com/en/scarlett_indepth
(vaadatud 12.04.22)

[15] J. Kordemets, Linnade helimaastik, magistritöö, 2020 (vaadatud 14.04.22)

[16] Shure SM58 https://pubs-api.shure.com/file/260007 (vaadatud 16.05.22)

[17] TDA 2050 võimendi skeem (vaadatud 12.04.22)
https://www.st.com/en/audio-ics/tda2050.html#st_description_sec-nav-tab

[18] L. K. Wang, N. C. Pereira ja Y.-T. Hung, Advanced Air and Noise Pollution Control, kd. 2, Totowa, New Jersey: Humana Press Inc., 2005.

[19] BOSS DD-6 efektiprotsessor (vaadatud 11.05.2022)
https://www.boss.info/us/products/dd-6/

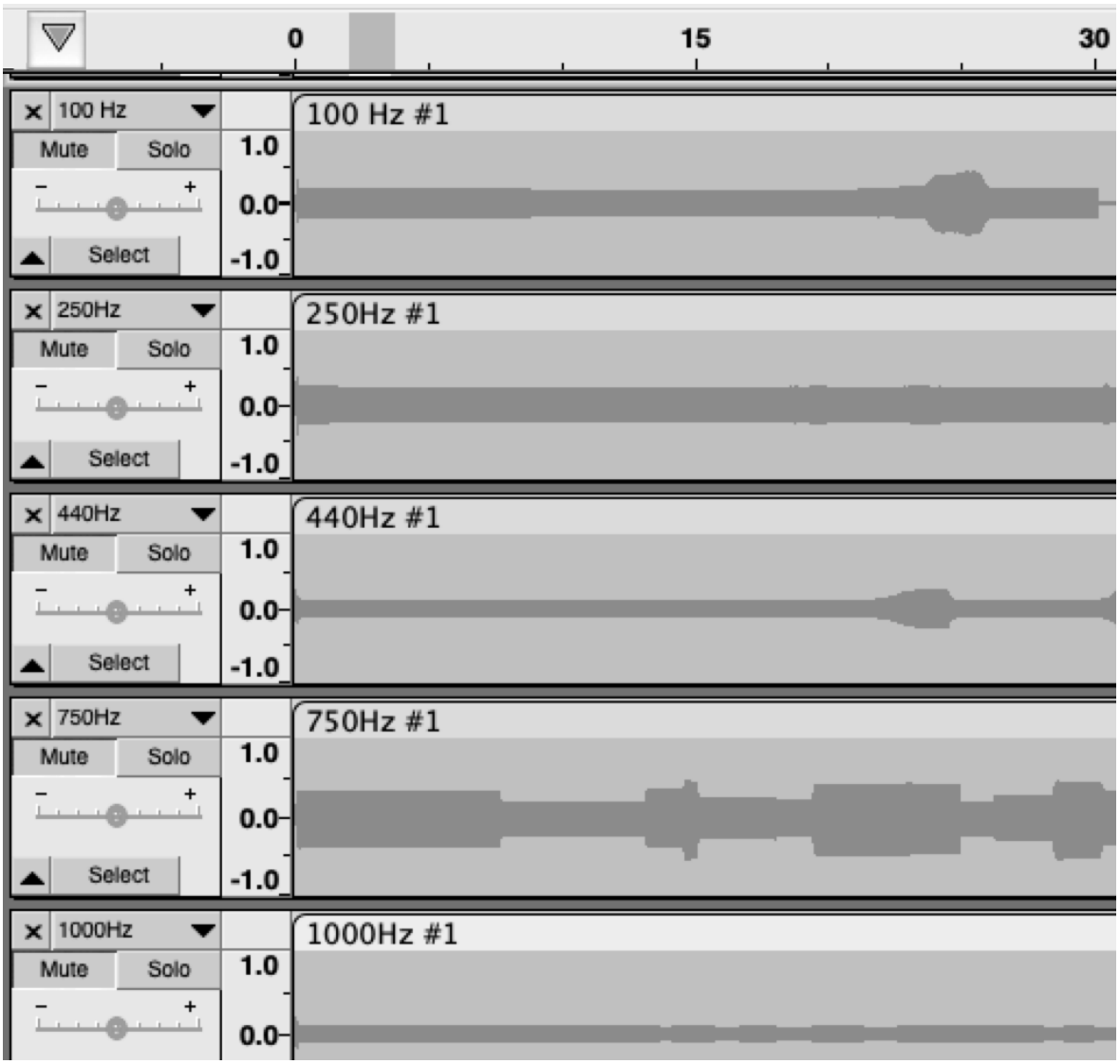
[20] EVS 932:2017, Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2017

[21] L. Y. L. Ang, Y. K. Koh, and H. P. Lee, "The performance of active noise-canceling headphones in different noise environments," Applied acoustics, vol. 122, pp. 16–22, 2017, doi: 10.1016/j.apacoust.2017.02.005.

[22] M. Narine, "Active Noise Cancellation of Drone Propeller Noise through Waveform Approximation and Pitch-Shifting", pp. 5–8, 2020

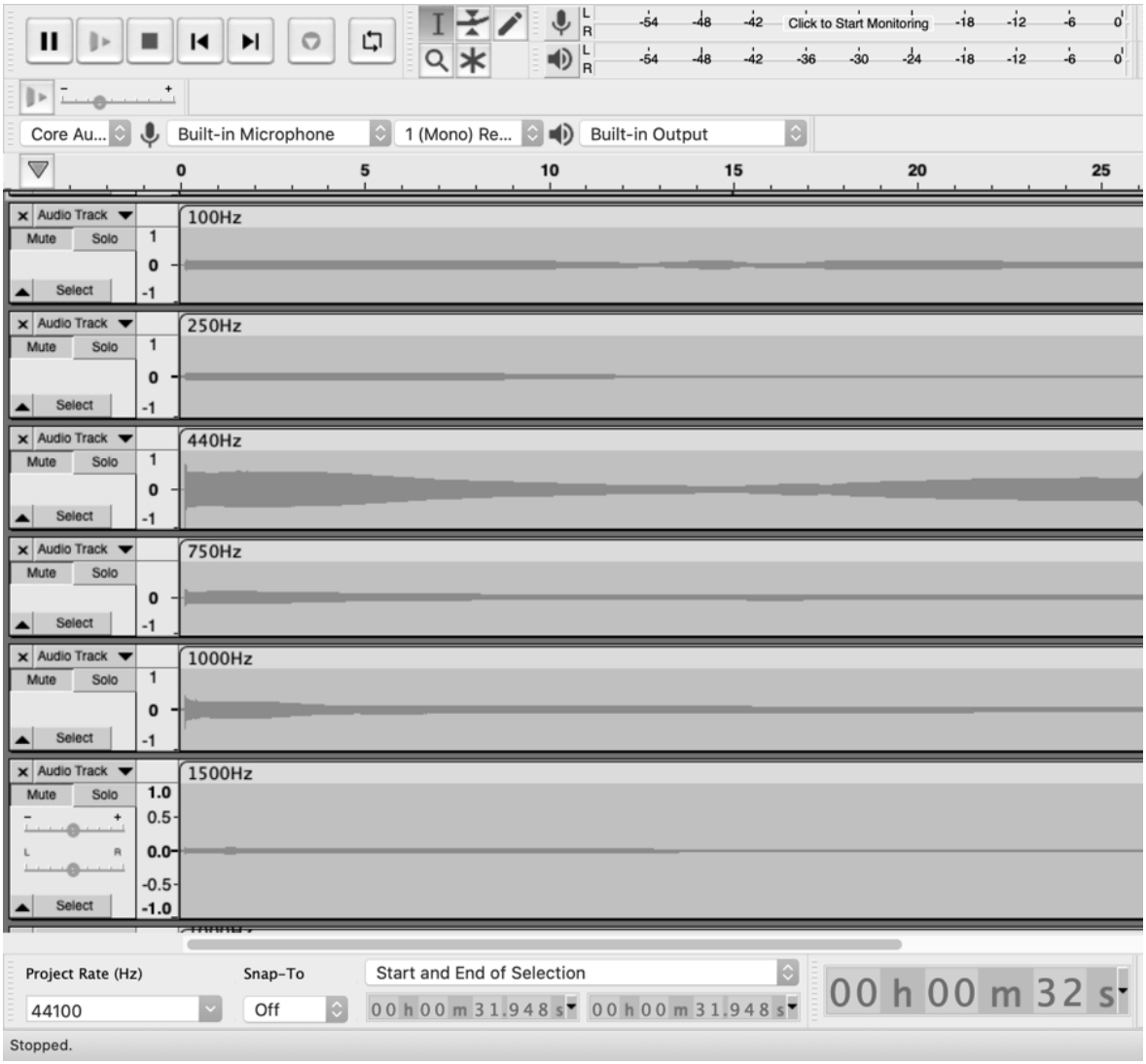
LISAD

Lisa 1. Siinustoonide ANC hilistamismeetodiga



Joonis 3.1. Audacity helirajad mõõdetud siinustoonidega hilistamismeetodiga

Lisa 2. Siinustoonide ANC muudetud polaarsuse meetodiga



Joonis 5.2. Audacity mõõdetud siinustoonidega helirajad muudetud polaarsuse meetodil

Lisa 3.Müraallikate ANC muudetud polaarsuse meetodiga

Joonis 5.3. Audacity mõõdetud müraallikate helirajad muudetud polaarsuse meetodil