

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Vraničar, P. 2012. Aktivno izničevanje prometnega hrupa. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentor Maher, T.): 54 str.

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Vraničar, P. 2012. Aktivno izničevanje prometnega hrupa. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Maher, T.): 54 pp.

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
SMER OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

PRIMOŽ VRANIČAR

AKTIVNO IZNIČEVANJE PROMETNEGA HRUPA

Diplomska naloga št.: 467/SOG

ACTIVE ROAD NOISE REDUCTION

Graduation thesis No.: 467/SOG

Mentor:

doc. dr. Tomaž Maher

Predsednik komisije:

doc. dr. Tomo Cerovšek

Član komisije:

viš. pred. dr. Peter Lipar

viš. pred. mag. Jure Kostanjšek

viš. pred. dr. Aleksander Srđić

Ljubljana, 21. 09. 2012

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisani Primož Vraničar izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Aktivno izničevanje hrupa«.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Črnomelj, 3.9.2012

(Podpis kandidata/-ke)

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	534.836:651.5(043.2)
Avtor:	Primož Vraničar
Mentor:	doc. dr. Tomaž Maher
Naslov:	Aktivno izničevanje prometnega hrupa
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – visokošolski študij
Obseg in oprema:	54 strani, 57 slik, 9 preglednic, 6 grafikonov, 31 prilog
Ključne besede:	zvok, izničevanje zvoka, promet, decibel

Izvleček

V gradbeništvu poznamo zvok kot proizvod objekta v gradnji ali pa objekta v sami uporabi. V splošnem se v gradbeništvu največ ukvarja z zvokom, kateri moti prebivalce, ki so v neposredni bližini ali pa v samem objektu. Takšen zvok, ki ima negativni vpliv na osebe, imenujemo hrup. Do pred kratim smo pri preprečevanju hrupa posvečali največjo pozornost fizičnim oviram, kot so protihrupne ograje in podobno, vzporedno pa je znanost zvoka razvila teorijo, da lahko hrup preprečimo tako, da zvok izničujemo s samim seboj. Takemu načinu pravimo aktivno izničevanje zvoka. Teoretično načelo izničevanja zvoka drži v idealnih pogojih studia, ampak ko preizkus prenesemo v prostor in realiziramo opazimo, da se zvok izničuje le deloma in to na določenih frekvencah bolj, na določenih frekvencah pa manj. V gradbeništvu pa v celoti nimamo opravka z določenimi frekvencami, ampak bolj spektri frekvenc, če ne celotnim frekvenčnim območjem. V prometu je hrup relativno težko nadzorovati. Imamo opravka z večjim spektrom oziroma območjem frekvenc. V diplomski nalogi sem preučil teoretično podlago izničevanja zvoka in jo primerjal z rezultati, katere sem pridobil v preizkusu v domačem studiu in na terenu. V zaključku sem zastavil podobo kombinacijske protihrupne ograje, ki delno fizično zmanjšuje hrup in delno z aktivnim protihrupnim sistemom.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC:	534.836:651.5(043.2)
Author:	Primož Vraničar
Supervisor:	doc. dr. Tomaž Maher
Title:	Active road noise reduction
Document type:	Graduation Thesis – Higher professional studies
Notes:	54 pages, 57 figures, 9 tables, 6 graph., 31 annex
Key words:	Sound, noise cancellation, traffic, comparison, decibel

Abstract

Theoretical principle of noise cancellation can be realized in the ideal studio conditions, but when the experiment is put into actual space and realized, we can see that the sound only partly cancels itself, on some frequencies more and on some less. However, in construction engineering we are not only dealing with certain frequencies but with frequency spectrums, if not with the whole frequency field. It is relatively hard to control the noise in traffic. We are dealing with a larger frequency spectrum or field. In my thesis I studied the theoretical basis of sound cancellation and compared it to the results I gained in an experiment in my home studio and in the field. In conclusion I presented an example of a combined noise barrier, which partly physically reduces noise and with an active anti noise system. In construction engineering the sound is known as a product of a structure under construction, or a structure already in use. In general, construction engineering mostly deals with the sound that bothers inhabitants in the vicinity of, or in the structure itself. Such sound that has negative effects on people is called noise. Until recently, most of the attention in preventing noise was dedicated to physical obstacles, like noise barriers. At the same time, a theory was developed by the science of sound that noise can be prevented by cancelling it out by itself. This is called active noise cancellation.

ZAHVALA

Za pomoč pri pripravi diplomske naloge se zahvaljujem mentorju doc. dr. Tomažu Maherju.

Zahvaljujem se tudi svojim najdražjim za podporo in vzpodbudo v času študija.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK.....	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA.....	V
1 UVOD	1
2 ZVOK.....	2
2.1 Kaj je zvok?	2
2.2 Nihanje.....	2
2.2.1 Sestavljanje nihanj.....	4
2.2.1.1 Enaki nihanji z enakimi fazami	4
2.2.1.2 Enaki nihanji z nasprotnima fazama	5
2.3 Zvočna energija	6
2.4 Zvočni tok.....	7
2.5 Zvočni tlak.....	8
2.6 Slušni prag	9
2.7 Jakost zvoka	9
2.8 Hrup	10
2.9 Merjenje hrupa	11
3 AKTIVNO IZNIČEVANJE ZVOKA.....	12
3.1 Zgodovina	12
3.2 Danes in v prihodnosti	15
3.3 Osnovna struktura sistema aktivnega izničenja zvoka	15
3.3.1 Prilagodljivo filtriranje	16
3.3.2 Povratno kontroliranje.....	18
3.3.3 Valovna oblika pulsov	18

3.3.4	Optimizacijski proces.....	19
3.4	Kontrolni vir zvoka – zvočni oddajniki in zvočni sprejemniki.....	20
3.4.1	Zvočnik.....	20
3.5	Referenčno zaznavanje	22
3.5.1	Mikrofon	22
3.5.1.1	Piezoelektrični mikrofon	22
3.5.1.2	Kondenzatorski mikrofon	23
3.6	Izničevanje zvoka v odprtih prostorih	24
4	IZNIČEVANJE ZVOKA V GRADBENIŠTVU	25
4.1	Aktivne protihrupne ograje	25
4.2	Absorberji zvoka.....	25
4.2.1	Porozni absorberji	25
4.2.2	Aktivni elektronsko uravnani absorberji	27
4.3	Difuzorji zvoka	27
4.4	Idejna zasnova aktivne protihrupne ograje.....	29
4.5	Optimizacija v današnjem času	31
5	PRAKTIČNI DEL – Meritve izničevanja zvoka	31
5.1	Namen preizkusa	31
5.2	Preizkus opravljen na Nizozemskem.....	31
5.3	Izničevanje zvoka v domačem studiu.....	35
5.4	Izničevanje zvoka ob cesti s protizvokom	44
5.4.1	Test frekvenc zvoka pri 50 km/h.....	45
5.4.2	Test frekvenc zvoka pri 70 km/h.....	46
5.4.3	Test frekvenc zvoka pri 100 km/h.....	47
5.5	Izničevanje zvoka avtomobila posnetega na terenu.....	48
5.6	Primerjava rezultatov.....	50
6	ZAKLJUČEK.....	51
	SEZNAM PRILOG	53

KAZALO SLIK

Slika 1: Iz kroženja izpeljana matematična oblika nihanja (Ravnikar, 1999: str.3.).....	2
Slika 2: Sinusna krivulja (http://sl.wikipedia.org/wiki/Amplituda)	3
Slika 3: ponazoritev vsote dveh nihanj z enakima fazama (Ravnikar, 1999: str.5.)	5
Slika 4: Izničenje zvoka (http://www.masonbretan.com/Active-Noise-Cancellation-and-Its-Applications.php)	6
Slika 5: Longitudinalno valovanje (Ravnikar, 1999: str.5.)	8
Slika 6: Krivulje pretvorb za človeško uho pri merjenju hrupa (Ravnikar, 1999: str.153.).....	12
Slika 7: Luegov patent iz leta (Hansen, 2001: str.3.).....	13
Slika 8: Olsonov zvočni absorber (Hansen, 2001: str.4.).....	13
Slika 9: Izničevanje zvoka v frekvenčnem območju - Olsonov zvočni absorber (Hansen, 2001: str.4.)14	
Slika 10: Conoverov aktivni zvočni sistem (Hansen, 2001: str.4.).....	14
Slika 11: Prilagodljivo filtriranje (Hansen, 2001: str.13.)	16
Slika 12: Prilagodljivo filtriranje z adaptivnim logaritmom (Hansen, 2001: str.15.).....	17
Slika 13: Prikaz frekvenčnega razpona jakost izničevanja zvoka v cevi (Eriksson&Allie, 1989: str.15.)	17
Slika 14: Povratna kontrola (Hansen, 2001: str.13.).....	18
Slika 15: Kontrolnik valovne oblika pulsov (Hansen, 2001: str.13.).....	19
Slika 16: Prikaz vplivov komponent (Hansen, 2001: str.20.).....	19
Slika 17: Shema zvočne skrinje (Hansen, 2001: str.70.)	21
Slika 18: Odprt zvočnik v ventilacijskem sistemu (Hansen, 2001: str.71.).....	21
Slika 19: Dve vrsti piezoelektričnih mikrofонов (Rossing, 2007: str.759.)	22
Slika 20: Notranjost kondenzatorskega mikrofona Oktava 319 (http://sl.wikipedia.org/wiki/Kondenzatorski_mikrofon)	23
Slika 21: Shema kondenzatorskega mikrofona (Rossing, 2007: str.758.)	23
Slika 22: Aktivni kontrolni sistem za reduciranje zvoka v odprtih prostorih (Hansen, 2001: str.124.) ...	24
Slika 23: Optimizacija zvočnega žepa (N. Petkovič, 2009: str. 30.)	26
Slika 24: Primer notranjega poroznega absorberja (N. Petkovič, 2009: str. 30.)	26
Slika 25: Shematski prikaz aktivnega absorberja (N. Petkovič, 2009: str. 41.).....	27
Slika 26: Oblike difuzorjev (N. Petkovič, 2009: str. 42.).....	28
Slika 27: Vrsta difuzerjev (N. Petkovič, 2009: str. 47.).....	28
Slika 28: Vrsta difuzerjev (N. Petkovič, 2009: str. 47.).....	28
Slika 29: Aktivna protihrupna ograja – pogled.....	29
Slika 30: Aktivna protihrupna ograja – prerez	30
Slika 31: Aktivna protihrupna ograja – tloris.....	30
Slika 32: Postavitev in situacija preizkusa (M.Krutzen, 2002: str.2.)	32
Slika 33: Postavitev in situacija preizkusa za določeno cestišče (M.Krutzen, 2002: str.7.)	33
Slika 34: Prikaz izničevanja zvoka za pri izvoru zvoka na višini 10 cm (M.Krutzen, 2002: str.9.).....	33

Slika 35: Prikaz izničevanja zvoka za pri izvoru zvoka na višini 75 cm (M.Krutzen, 2002: str.9.).....	34
Slika 36: Prikaz izničevanja zvoka za pri višini anti-zvoka 4,5 m (M.Krutzen, 2002: str.10.)	34
Slika 37: Prikaz izničevanja zvoka za pri višini anti-zvoka 1,5 m (M.Krutzen, 2002: str.10.)	34
Slika 38: Studio.....	35
Slika 39: Postavitev zvočnika in v ozadju izolacija za preprečevanje odmeva zvoka	35
Slika 40: Merilec glasnosti zvoka Bruel&Kjaer mediator 2238 (http://www.bksv.com/)	36
Slika 41: Skica postavitve merilne naprave, zvočnikov in mere sobe.....	37
Slika 42: Prikaz postavitve merilne naprave ter zvočnikov	37
Slika 43: Prikaz programske nastavitve kanalov	38
Slika 44: Postavitev mikrofонов ob cestišču	44
Slika 45: Postavitev mikrofонов in snemalne opreme	45
Slika 46: 1. korak pri hitrosti 50 km/h	45
Slika 47: 2. korak pri hitrosti 50 km/h	46
Slika 48: 3. korak pri hitrosti 50 km/h	46
Slika 49: 4. korak pri hitrosti 50 km/h	46
Slika 50: 1. korak pri hitrosti 70 km/h	46
Slika 51: 2. korak pri hitrosti 70 km/h	47
Slika 52: 3. korak pri hitrosti 70 km/h	47
Slika 53: 4. korak pri hitrosti 70 km/h	47
Slika 54: 1. korak pri hitrosti 100 km/h	47
Slika 55: 2. korak pri hitrosti 100 km/h	47
Slika 56: 3. korak pri hitrosti 100 km/h	48
Slika 57: 4. korak pri hitrosti 100 km/h	48

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Zvočni tok glede na vir zvoka (Ravnikar, 1999: str.21.).....	8
Preglednica 2: Jakost nekaterih zvočnih virov (Ravnikar, 1999: str.24.)	10
Preglednica 3: Prikaz zmanjšanja hrupa na določenih točkah preizkusa (M.Krutzen, 2002: str.2.).....	32
Preglednica 4: Zmanjšanje / Izničenje zvoka pri posameznih frekvencah.....	39
Preglednica 5: Zmanjšanje / Izničenje zvoka pri spektru frekvenc.....	42
Preglednica 6: Zmanjšanje / Izničenje zvoka pri spektru frekvenc 20 Hz – 20 kHz (beli šum)	43
Preglednica 7: Zmanjšanje / Izničenje zvoka pri frekvencah 20 Hz – 20 kHz (tekoče frekvence)	44
Preglednica 8: Zmanjšanje / Izničenje zvoka s posnetkom mikrofona beta 58.....	48
Preglednica 9: Zmanjšanje / Izničenje zvoka s posnetkom mikrofona SM 58	49

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Zmanjšanje zvoka z urejanjem PAN – L/R.....	40
Grafikon 2: Izničevanje zvoka pri posameznih frekvencah z zamenjavo faz	41
Grafikon 3: Izničevanje zvoka z urejanjem PAN – L/R	42
Grafikon 4: Izničevanje zvoka pri spektru frekvenc z zamenjavo faz	43
Grafikon 5: Zmanjšanje / Izničenje zvoka s posnetkom mikrofona beta 58	49
Grafikon 6: Zmanjšanje / Izničenje zvoka s posnetkom mikrofona SM 58.....	49

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

cps	cycle per second – obkroženje na sekundo
ISO	International Standards Organisation – Internacionalna organizacija za standarde
dB	decibel
Hz	Hertz
A/D converter	analogni – digitalni konverter
Driver	izolirani zvočni generator

1 UVOD

V gradbeništvu se pogosto srečavamo z hrupom, posebej ko obravnavamo promet. Hrup v prometu lahko delimo na hrup kateri se širi po zraku ter udami zvok, ki se širi po konstrukcijah, bodisi zgradbah ali cestišču. Da bi hrup zmanjšali ali omejili do določenega nivoja glasnosti moramo ob prometnicah nameščati protihrupne ovire. Gradbeništvo je z leti razvilo raznorazne protihrupne ukrepe, kateri so zasnovani predvsem na osnovi fizičnih ovir. Pri postavitvi fizičnih protihrupnih ovir pa na okolje vplivamo z vizualnim učinkom. Tako se je razvila teorija, da bi s čim manjšim vizualnim posegom v naravo zmanjševali hrup tako, da bi ga izničevali s samim sabo. Takšno zmanjševanje zvoka imenujemo aktivno izničevanje zvoka.

Aktivno izničevanje zvoka ima zasnovano osnovno teoretično podlago, ki pa ni toliko raziskana v praksi. Problematika samega izničevanja zvoka nastane pri vplivu okolice ali prostora, ki ni idealen. S poskusi so že večkrat dokazali izničevanja zvoka pri posameznih frekvencah, ampak to v zaprtih prostorih, kjer so zvok spuščali v ceveh. Rezultati so bili dokaj uspešni, ampak nikoli pa niso prišli do popolne tišine, kar je tudi razumljivo.

V diplomski nalogi sem se osredotočil na izničevanja jakosti zvoka posameznih frekvenc, spektrov frekvenc in izničevanju jakosti zvoka oziroma hrupa, kateri se proizvede s prometom. Rezultate preizkusa pridobljene na terenu in v studiu sem predstavil v tabelah in grafikonih ter jih komentiral v primerjavi teoretičnih načel. Na podlagi raziskav sem zasnoval model protihrupne ograje, kateri bi del hrupa zmanjševal fizično del hrupa pa z aktivnim protihrupnim sistemom. Takšne vrste protihrupnih ograj bi zmanjševale višine protihrupnih ograj ter zmanjševale vizualni vpliv na okolico.

2 ZVOK

2.1 Kaj je zvok?

Zvok je vse kar slišimo in občutimo, zaznavamo ga s čutilom za sluh ali pa občutimo vibracije s telesom. Znanje o valovanju zvoka uporabljamo v različnih znanostih, na primer v medicini in ga imenujemo ultrazvok kateri je v območju nad človeškim slišnim območjem, na drugi strani pa imamo infra zvok, kateri je pod našim slišnim območjem.

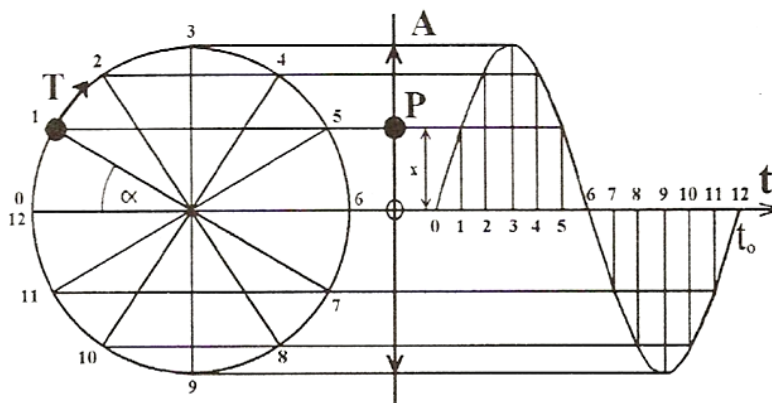
»Zvok je mehansko valovanje, ki se širi v dani snóvi (trdnini, kapljevini ali plinu).« Zvok lahko opredelimo s frekvenco in amplitudo zvočnega tlaka. Prva je povezana z višino tona, druga z glasnostjo.

V ožjem pomenu definiramo kot zvok le zvočno valovanje s frekvencami v slišnem območju človeškega ušesa, to je med 20 Hz in 20.000 Hz. Zvok z nižjimi frekvencami imenujemo infrazvok, z višjimi pa ultrazvok.

Zvok opišemo kot mehansko valovanje, kateri se širi v različnih snoveh (trdnini, kapljevini in plinu). Opredelimo ga s frekvenco in amplitudo zvočnega tlaka. Frekvenca nam pove višino tona, velikost amplitude pa je odvisna od glasnosti. Zvok v praksi definiramo z Hz (Herc) in to v območju 20Hz – 20 000Hz, saj to je naše teoretično slišno območje. [1]

2.2 Nihanje

Nihanje je periodično gibanje, ki je lahko počasno ali hitro in ga matematično izpeljemo iz kroženja. Na sliki 1 vidimo točko T, ki kroži po krožnici v smeri urinega kazalca. Točka T se pomika zaporedoma po obodnih točkah od 1 do 12 na krožnici. Polmer kroga označimo z A, oddaljenost projekcije P od središčne lege z x in kot ki ga oklepa z začetnim polmerom z α . [2]



Slika 1: Iz kroženja izpeljana matematična oblika nihanja (Ravnikar, 1999: str.3.)

Iz slike 1 lahko razberemo naslednjo povezavo:

$$x = A \sin \alpha \quad (1)$$

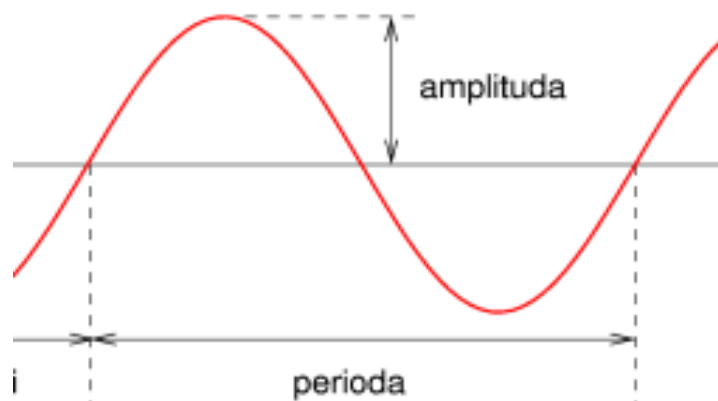
Kot α je v odvisnosti od časa in se spreminja. Kotna hitrost je enaka kotu α , ki ga opiše polmer A v času t . Kot α v tem primeru izražamo v radianih. Označimo jo z ω . [2]

$$\omega = \frac{\alpha}{t} \text{ oziroma } \alpha = \omega t \quad (2)$$

iz česar sledi osnovna enačba nihanja:

$$x = A \sin \omega t \quad (3)$$

Kot vidimo na sliki 2, nam časovni potek nihanja predstavlja sinusna krivulja ali sinusoida. Njen največji odklon navzgor in največji odklon navzdol nam predstavlja amplitudo. [2]



Slika 2: Sinusna krivulja (<http://sl.wikipedia.org/wiki/Amplituda>)

Izraz (3) nam pove, kakšne so razsežnosti nihanja, ne pove nam pa ničesar o njegovi hitrosti. Izračunamo jo, če opazujemo čas enega nihanja t_0 , oziroma toliko kolikor časovno potrebuje točka T za eno krožno gibanje. Iz tega lahko sklepamo, da je število nihlajev obratno sorazmerno času t_0 . Število nihlajev, ki se zgodijo v 1 sekundi imenujemo frekvenca nihanja in ima simbol f . [2]

$$f = \frac{1}{t_0} \quad (4)$$

Frekvenca ima enoto Hz (Hertz), 1Hz torej pomeni 1 nihaj na sekundo. V nekaterih deželah uporabljajo enoto *cps* oziroma eno obkroženje na sekundo. [2]

$$1 \text{ Hz} = [1 \text{ s}^{-1}] \quad (5)$$

Ker smo v enačbi 3 definirali kotno hitrost, lahko ugotovimo kakšna je povezava med kotno hitrostjo in frekvenco. Rečemo, da v času enega obkroženja t_0 opiše polmer A polni kot 2π radianov (360°). Tako enačba dobi naslednjo obliko: [2]

$$2\pi = \omega t_0 \quad (6)$$

in ker je $t_0 = \frac{1}{f}$ sledi

$$\omega = 2\pi f \quad (7)$$

Za kotno hitrost ω uporabljamo tudi izraz krožna frekvenca. To pa dobimo tako, da pomnožimo f z 2π . Zato moramo biti pozorni pri zapisu frekvenca, in se prepričati ali gre za frekvenco ali krožno frekvenco. [2]

2.2.1 Sestavljanje nihanj

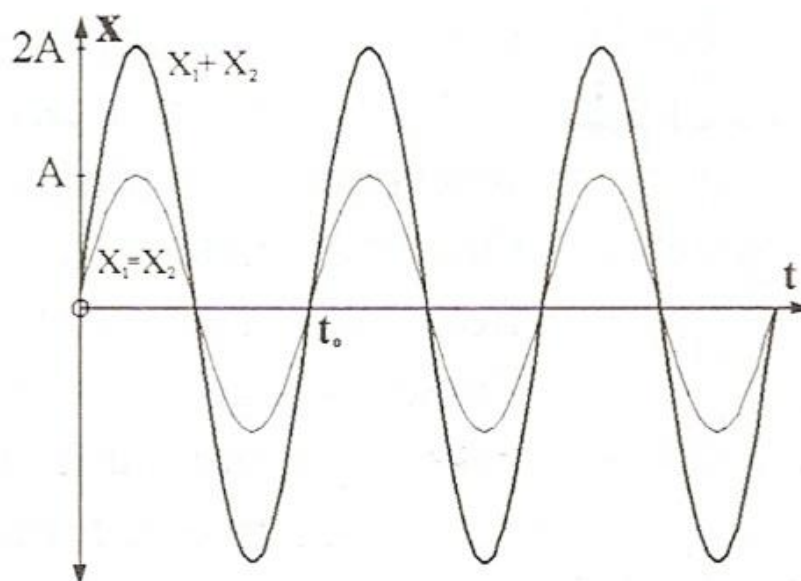
»Kadar sovpada več nihanj, govorimo o njihovi superpoziciji. Kot rezultat dobimo sicer eno samo rezultantno nihanje, ki pa ima lahko na prvi pogled zelo zapleteno obliko in je videti neizrazljivo s sinusno funkcijo. K sreči ta vtis vara in lahko tudi bolj zapletene oblike nihanj izrazimo z več sinusnimi funkcijami.« [2]

2.2.1.1 Enaki nihanji z enakimi fazami

Kadar imamo opravka z dvema enakima nihanjema, katera imata enako fazo, ju matematično lahko obravnavamo na način seštevanja: [2]

$$x_1 = x_2 = A \sin \omega t \quad (8)$$

$$x_1 + x_2 = A \sin \omega t + A \sin \omega t = 2 A \sin \omega t \quad (9)$$



Slika 3: ponazoritev vsote dveh nihanj z enakima fazama (Ravnikar, 1999: str.5.)

2.2.1.2 Enaki nihanji z nasprotnima fazama

Kadar imamo opravka z dvema nasprotnima nihanjema, katera imata nasprotno fazo, ju lahko zapišemo z funkcijo, ki ima enačbo:

$$x_1 = A \sin \omega t \quad (10)$$

Druga funkcija (11) je fazno premaknjena za polovico nihanja oziroma za π .

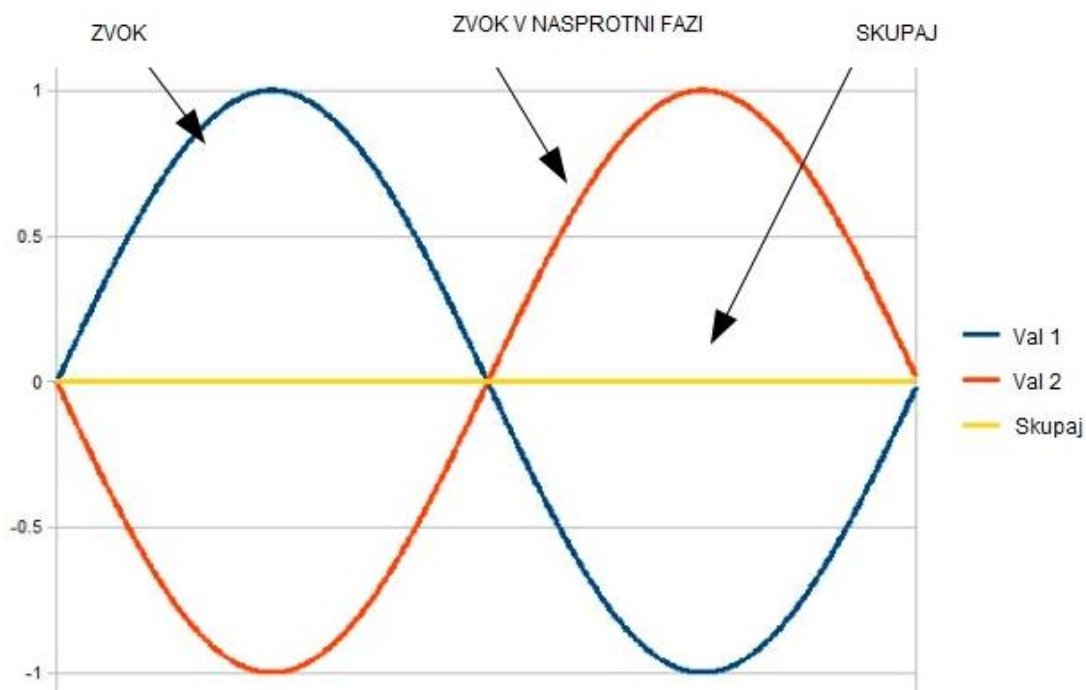
$$x_2 = A \sin (\omega t + \pi) \quad (11)$$

Iz osnov matematike vemo, da je

$$\sin (x + \pi) = -\sin x \quad (12)$$

in iz tega sledi

$$x_1 + x_2 = A \sin \omega t - A \sin \omega t = 0 \quad (13)$$



Slika 4: Izničenje zvoka (<http://www.masonbretan.com/Active-Noise-Cancellation-and-Its-Applications.php>)

Dve enaki nihanj, kateri imata nasprotno fazo se med seboj izničita. [2]

2.3 Zvočna energija

»V določenem trenutku ima vsaka nihajoča molekula zraka kinetično energijo, ki je enaka polovici produkta mase in kvadrata njene trenutne hitrosti« [2]

$$W = \frac{m v^2}{2} \quad (14)$$

Ob spreminjanju hitrosti se tako spreminja tudi kinetična energija. V praksi nas bolj zanima efektivna vrednost kinetične energije, ki pa je določena z efektivno vrednostjo hitrosti: [2]

$$W = m (v_0/\sqrt{2})^2 = m v_{ef}^2 \quad (15)$$

»Med molekulami, ki nihajo z enakimi amplitudami, a različnimi hitrosti, imajo večjo energijo tiste, ki nihajo z višjo frekvenco. Kinetično energijo molekul zraka imenujemo zvočna energija«. [2]

2.4 Zvočni tok

Vsaka molekula zraka, katera ima določeno zvočno energijo, je ta določena v prostornini V . Za praktične primere nam ta parameter ne pove veliko, zato je za nas bolj pomembna energija, katero nosi zvočno valovanje iz točke A do točke B in jo imenujemo zvočni tok. Zvočni tok (enačba 16) je enak množini zvočne energije W , katera gre v časovni enoti t skozi ploskev S . [2]

$$j = \frac{W}{St} \quad (16)$$

V formulo (16) vstavimo izraz W ter pomnožimo števec in imenovalec z dolžino poti l in dobimo:

$$j = \frac{mlv_{ef}^2}{St} \quad (17)$$

Če privzamemo da je $\frac{m}{Sl} = \rho$ (gostota zraka), $\frac{l}{t} = c$ (hitrost širjenja zvoka), dobimo končni izraz:

$$j = \rho cv^2 \quad (18)$$

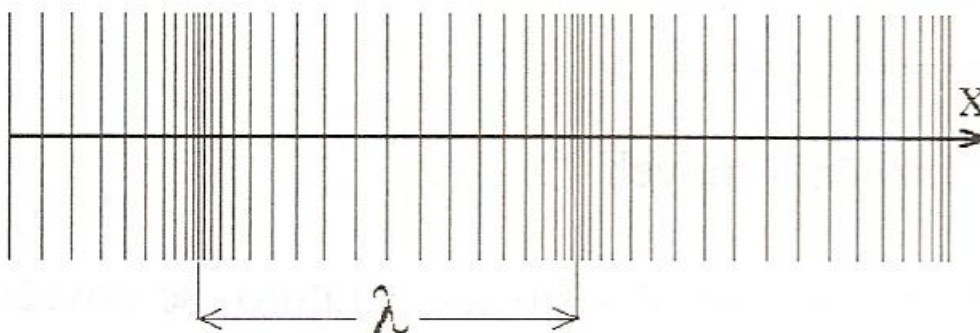
Enota zvočnega toka je $1 W/m^2$ ali $1 kg s^{-3}$. Preglednica 1 prikazuje vrednosti zvočnih tokov za nekaj najbolj značilnih virov zvoka: [2]

Preglednica 1: Zvočni tok glede na vir zvoka (Ravnikar, 1999: str.21.)

Vir zvoka	$j [W/m^2]$
Slušni prag	10^{-12}
Šelestenje listja	10^{-11}
Šepetanje	10^{-10}
Tiktakanje budilke	10^{-9}
Umirjeno govorjenje	10^{-8}
Mirna cesta, pisarna	10^{-7}
Pogovor, klavir	10^{-6}
Prometna cesta	10^{-5}
Avtobus, motorno kolo	10^{-4}
Petje, vpitje	10^{-3}
Pop glasba, tkalnica	10^{-2}
Pnevmatična kladiva	10^{-1}
Letalski motor v razdalji 10m	1
Vojaški top	10
Prag bolečine	100

2.5 Zvočni tlak

Glede na dosedanje opisovanje zvočnih parametrov je njihova slaba lastnost v tem, da niso neposredno merljivi. Dejansko ne moremo izmeriti niti trenutne, niti efektivne vrednosti amplitude ali hitrosti nihanja molekul zraka. Lahko pa izmerimo zvočni tlak. Če pogledamo sliko 5, sestavljajo valovanje zraka zgoščine in razredčine. V prvih so molekule bolj stisnjene med seboj in posledično je tlak v tem območju višji. Obratno pa se zgodi v razredčinah. Te spremembe merimo z občutljivimi mikrofoni (fonometer) od nižjega tlaka 10^{-9} bara pa vse do 10 barov. [2]



Slika 5: Longitudinalno valovanje (Ravnikar, 1999: str.5.)

2.6 Slušni prag

Danes je tehnologija prišla do tako daleč, da lahko merimo zvočni tlak in frekvence z raznoraznimi merilnimi napravami glasnosti, katere lahko izmerijo natančne meritve tlaka tudi v območju, ki ga naše uho ne zaznava. To mejo poimenujemo slušni prag. Preizkusi so pokazali, da je za naše uho v povprečju sliši do mejne vrednosti zvočnega tlaka. [2]

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \quad (19)$$

Če preračunamo zvočni tlak v zvočni tok, dobimo j_0 :

$$j_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (20)$$

2.7 Jakost zvoka

Odziv ušesa je po Weber-Fechnerjevem zakonu logaritmičen. Občutek, ki ga ustvari zvočni dražljaj imenujemo jakost zvoka (L). Če hočemo ustvariti ustrezno lestvico glasnosti, potem označimo naš slušni prag z $L = 0 \text{ dB}$ (to je enako 10^{-12} W/m^2 zvočne energije na m^2 ploskve pri frekvenci 1000 Hz). Dražljaj lahko zapišemo kot razmerje med j/j_0 , občutek (jakost) pa kot logaritem tega razmerja. Zanj je bila določena enota Bel (po izumitelju Graham Bellu), ki pa je bila za uporabljanje v praktične namene prevelika, zato je bila prevzeta 10-krat manjša enota 1 decibel z oznako 1 dB. Jakost zvoka lahko potem takem s pomočjo Weber-Fechnerjevega zakona zapišemo kot: [2]

$$L = 10 \log \left(\frac{j}{j_0} \right) \text{ dB} \quad (21)$$

V izrazu (21) se pojavi desetiški Briggsov logaritem. Če želimo naprej računati z naravnimi logaritmi, je potrebno njegovo vrednost pomnožiti s pretvornim faktorjem 0,4343 in iz tega sledi: [2]

$$L = 4,343 \ln \left(\frac{j}{j_0} \right) \text{ dB} \quad (22)$$

Vsakemu zvočnemu toku kateri je okrog nas ustreza določena glasnost, katero lahko zapišemo v decibelih in je prikazana v naslednji tabeli: [2]

Preglednica 2: Jakost nekaterih zvočnih virov (Ravnikar, 1999: str.24.)

Vir zvoka	L [dB]
Slušni prag	0
Šelestenje listja	10
Šepetanje	20
Tiktakanje budilke	30
Umirjeno govorjenje	40
Mirna cesta, pisarna	50
Pogovor, klavir	60
Prometna cesta	70
Avtobus, motorno kolo	80
Petje, vpitje	90
Pop glasba, tkalnica	100
Pnevmatična kladiva	110
Letalski motor v razdalji 10m	120
Vojaški top	130
Prag bolečine	140

2.8 Hrup

»Hrup v okolju je vsak nezaželen ali škodljiv zunanji zvok, ki ga povzročajo človekove aktivnosti, vključno s hrupom, ki ga oddajajo prevozna sredstva v cestnem, železniškem in letalskem prometu ter naprave na območjih z industrijsko dejavnostjo, kot so na primer naprave, za katere je potrebno pridobiti okoljevarstveno dovoljenje v skladu s predpisi, ki urejajo emisije naprav, ki lahko povzročajo onesnaženje večjega obsega.« [3]

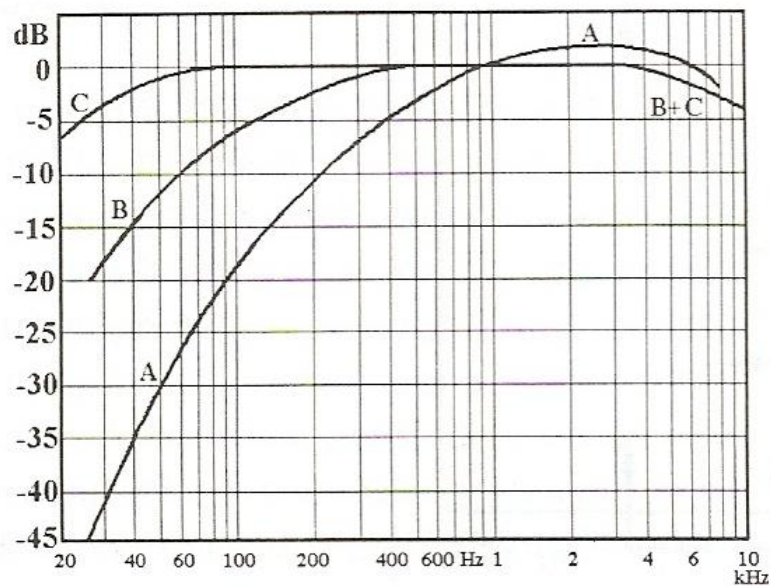
»Doživljanje hrupa je subjektivne narave in ljudje se nanj različno odzivamo. Hrup, ki nekaterim povzroča motnjo, lahko drugi komaj zaznamo ali občutimo. Na ljudi pa lahko vpliva že zgolj zaradi tega, da povzroči v nas vznemirjenost samo zato, ker je »slišen«. A ne glede na subjektivno doživljanje hrupa je tedaj, ko ravni hrupa naraščajo, motena naša komunikacija, lahko je moten naš spanec in v ekstremnih razmerah resnično vpliva na fizično ugodje ljudi.«.[3]

»Vir onesnaževanja okolja s hrupom je:

- avtocesta, hitra cesta, glavna cesta I. in II. reda, regionalna cesta I., II. in III. reda in cesta, na kateri letni pretok presega milijon vozil;
- glavna železniška proga in regionalna železniška proga, vključno s pripadajočimi železniškimi postajami;
- letališče in helikoptersko vzletišče;
- pristanišče, skladišče ali druge odprte površine za pretovor blaga, če letna masa tega blaga presega 10.000 ton;
- odprto parkirišče, na katerem letni pretok vozil presega milijon vozil, razen tistih, ki so v skladu s predpisom, ki ureja javne ceste, del avtoceste, hitre ceste, glavne ceste I. in II. reda ali regionalne ceste I., II. in III. reda;
- naprava, katere obratovanje zaradi izvajanja industrijske, obrtne, proizvodne, storitvene in podobnih dejavnosti ali proizvodne dejavnosti v kmetijstvu ali gozdarstvu povzroča v okolju stalen ali občasen hrup. Ta naprava je tudi objekt za izkoriščanje ali predelavo mineralnih surovin, strelišče ali poligon za uničevanje neeksplozivnih ubojnih sredstev, objekt za športne ali druge javne prireditve, zasidrano plovilo na katerem zaradi izvajanja proizvodne ali storitvene dejavnosti nastaja hrup, gostinski ali zabaviščni lokal v ne zagrajenem ali ne prekritem prostoru, če uporablja zvočne naprave, gradbišče izven zaprtih in prekritih prostorov stavb in zabaviščni objekt (npr. avtodrom, vrtiljak ali športno strelišče). Za napravo šteje tudi gostinski ali zabaviščni lokal, za katerega je treba na podlagi zakonodaje pridobiti okoljevarstveno dovoljenje, ne glede na to, da se dejavnost izvaja v zagrajenem in prekritem prostoru stavbe;
- obrat, če je na njegovem območju ena ali več naprav iz prejšnje alineje, ki so vir hrupa;
- javna prireditev in javni shod z uporabo zvočnih naprav, ki povzročajo hrup, če se odvija na prostem, v odprtem prostoru stavbe ali na odprti ali nepokriti površini objekta ali stavbe.« [3]

2.9 Merjenje hrupa

Za merjenje hrupa danes uporabljamo profesionalne merilnike hrupa, kateri merjeni frekvenci izmeri zvočni tlak. Iz le-te izračuna in poda vrednost v decibelih. Moramo pa biti pozorni pri meritvah, ki imajo namembnost na področju hrupa in sluha. Naše uho ima različno občutljivost pri različnih frekvencah. Tako je organizacija ISO (*International Standards Organisation – Internacionalna organizacija za standarde*) priporočila tri krivulje, kar pa je pripeljalo velikokrat do nesporazumov in napak. Sedaj je obveljala le krivulja A. [2]



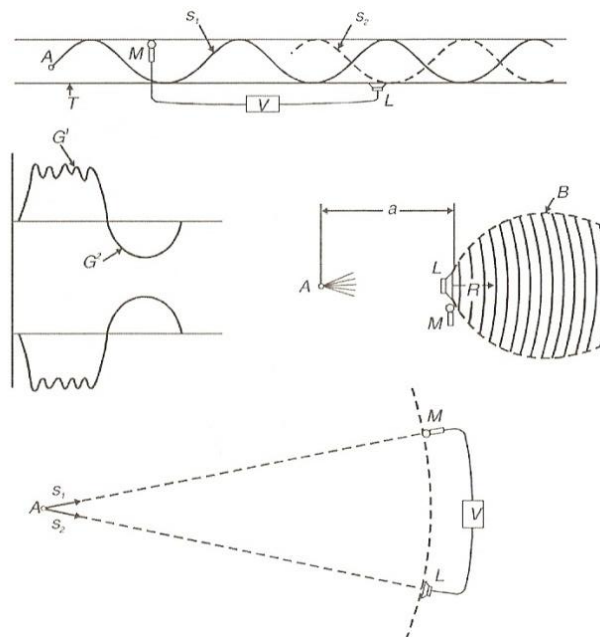
Slika 6: Krivulje pretvorb za človeško uho pri merjenju hrupa (Ravnikar, 1999: str.153.)

3 AKTIVNO IZNIČEVANJE ZVOKA

3.1 Zgodovina

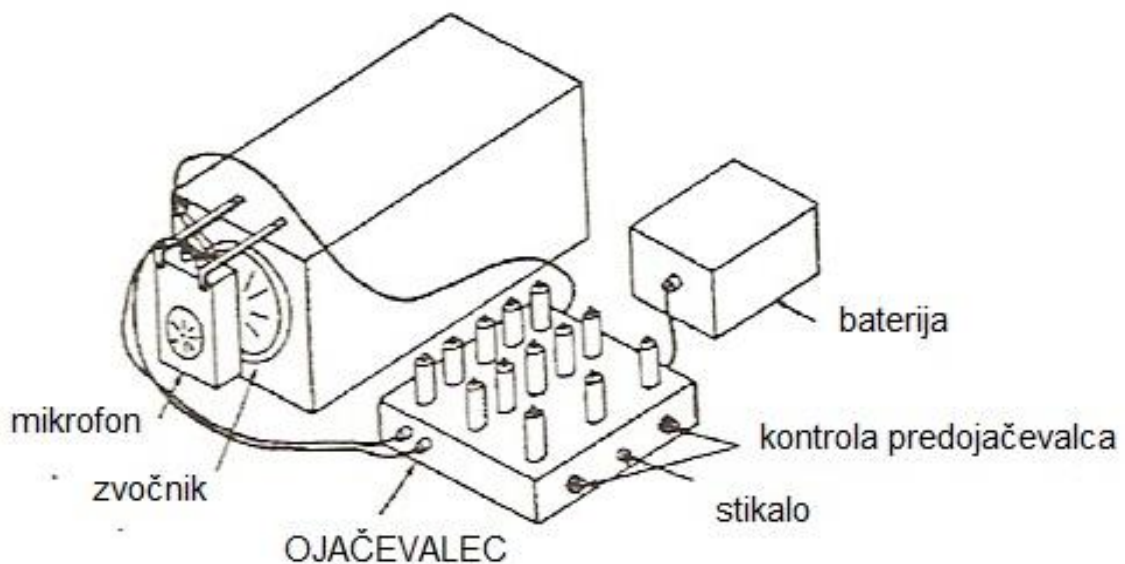
Prvi, ki je opazil izničevanje zvoka, je bil Thompson leta 1878 in to z uporabo dveh telefonov. Vse skupaj pa je bilo patentirano šele leta 1930, ko je francoski inženir H. Coanda zapisal svoj patent. Opisal je elektro-akustični sistem, ki ga sestavlja mikrofonski ojačevalnik in zvočnik. Teoretično je sistem generiral signal v obratni fazi od originalnega zvoka in tako izničeval zvok. [4]

Leta 1933 je nemški fizik P. Lueg razkril in patentiral idejo o izničevanju zvoka v cevi kot kaže slika 7. Oba znanstvenika pa nista uspešno demonstrirala preizkusa. Luegov patent je imel to slabost, da ni bil fleksibilen na temperaturne spremembe. [4]

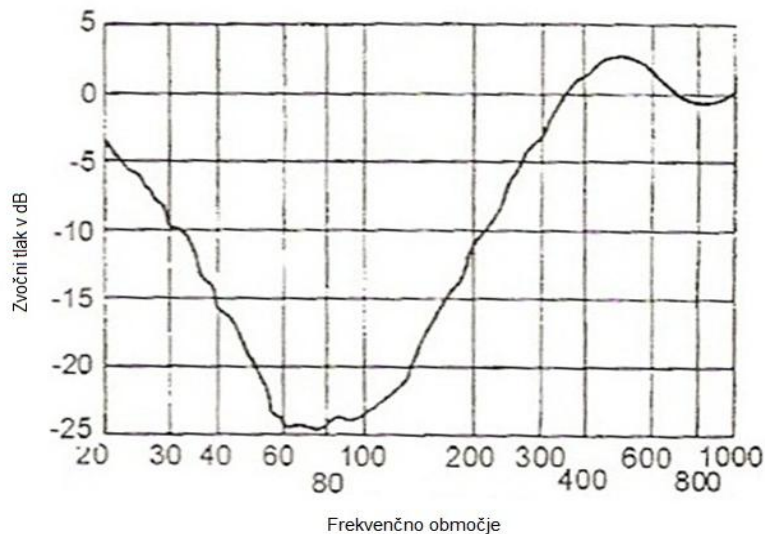


Slika 7: Luegov patent iz leta (Hansen, 2001: str.3.)

V letu 1950 pa je Olson raziskal obe teoriji izničevanja zvoka. Preizkus je naredil v prostoru, cevi in slušalkah. Eden izmed njegovih preizkusov je prikazan na sliki 8. Žal je Olsonov sistem proizvedel zelo omejeno atenuacijo in to na zelo ozkem frekvenčnem območju. [4]

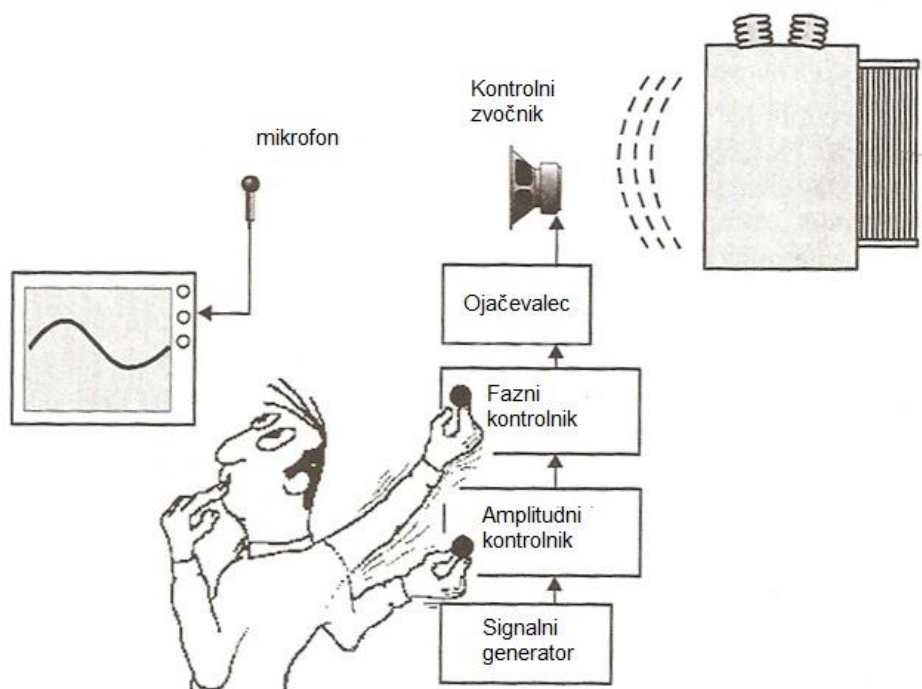


Slika 8: Olsonov zvočni absorber (Hansen, 2001: str.4.)



Slika 9: Izničenje zvoka v frekvenčnem območju - Olsonov zvočni absorber (Hansen, 2001: str.4.)

Le malo kasneje, leta 1956 je W. Conover demonstriral aktivno izničevalni sistem (slika 9). Ta sistem je moral biti upravljan ročno in je imel posledično zelo majhen kot od zvočnika do mikrofona, zato je bil že na prvi pogled neuporaben. Potrebno bi bilo tudi veliko zvočnikov in mikrofonov da bi zajeli določeno območje zvoka.[4]



Slika 10: Conoverov aktivni zvočni sistem (Hansen, 2001: str.4.)

3.2 Danes in v prihodnosti

Četudi v prejšnjih obdobjih raznorazni poizkusi niso dali najbolj uspešnih rezultatov, so postavili temelje aktivnega izničevanja zvoka za raziskovanje v sedanjem času. Danes in v prihodnosti ima aktivno izničevanje zvoka potencialno usmerjenost na več področjih:

- hišni aparati (hladilniki, pralni stroji, klimatske naprave, ...),
- avtomobilizem (zvok motorja, zvok cestišča),
- industrijski zvok,
- letala in helikopterji (zvok v kabinah) ...[4]

Veliko preizkusov in raziskav aktivnega izničevanja zvoka je bilo opravljenih v laboratorijih. Sprememba obnašanja mehanizma nastane pri prenosu tehnične opreme na teren oziroma v okolje, kjer so prisotni še drugi faktorji. Pri prenosu preizkusa iz laboratorija na teren nastanejo relativno veliki finančni stroški saj sistem sestavljajo zunanji elektronski sistem, zunanji mikrofoni in zvočniki.

Uspešna delujoča raziskava je bila zmanjšanje hrupa v avtomobilu, vendar je zaenkrat strošek vgradnje prevelik. Napredek pri hrupu v osebnem avtomobilu bi že bil če se bi aktivni izničevalni sistem zvoka priključil na radijski sistem ozvočenja, ki je že v avtomobilu in pri tem nebi oviral prvotnega zvoka glasbe.

Trenutno sistem, ki bi zajemal vse faktorje regulacije še ne obstaja. Pod pojmom faktorji imamo v mislih prostorski vpliv, uravnavanje največje amplitude, uravnavanje maksimalne in minimalne moči predojačevalca. [4]

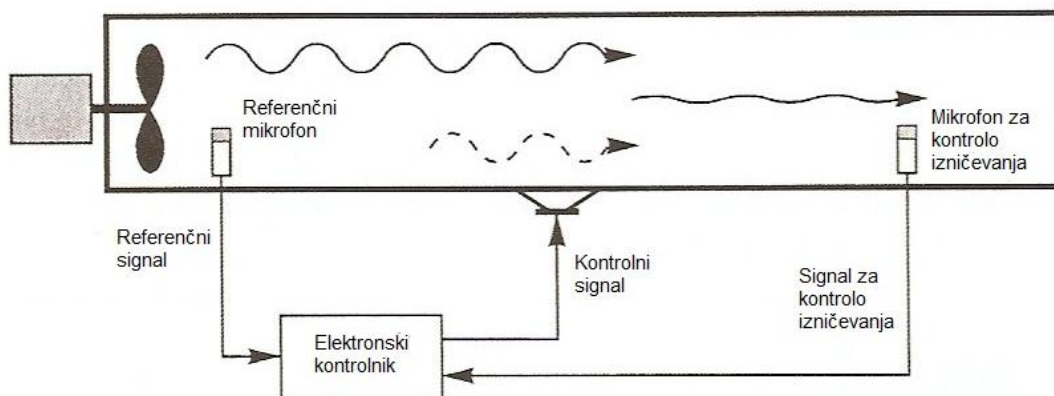
3.3 Osnovna struktura sistema aktivnega izničevanja zvoka

Osnovna struktura sistema temelji na sprejemanju primarnega zvoka, kateremu obrnemo oziroma zamenjamo fazo, in ga kot sekundarni zvok sprostimo nasproti primarnemu zvoku. Ta sistem je idealen na območju nizkih frekvenc oziroma pod 500 Hz. Za frekvenčno območje višje od 500 Hz, je bolj primeren pasivni sistem. Tako bi torej lahko ponazorili aktivni sistem izničevanja zvoka. [4]

Spoznali bomo dva tipa aktivnih zvočnih sistemov in sicer prilagodljivo filtriranje in valovno obliko pulsov. Sisteme lahko najlažje opišemo in razložimo na primeru cevi po kateri teče zvok.[4]

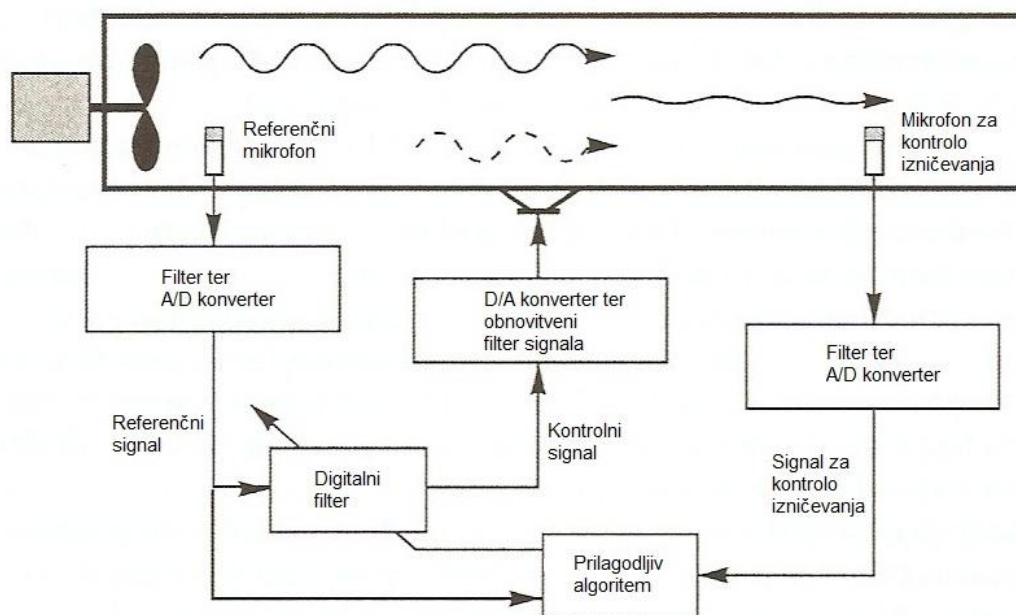
3.3.1 Prilagodljivo filtriranje

Prilagodljivo filtriranje je sistem, ki ga delimo na poslano in povratno kontrolo. Je sistem pri katerem imamo komponente kot so referenčni senzor, elektronska enota, kontrolni oddajnik in senzor, ki javlja pravilnosti in napake. Pot vhodnega signala se začne, ko ga referenčni senzor, ki je v našem primeru mikrofonski, zazna. Ta ga pošlje v elektronsko enoto, katera ga fazno obrne in ga pošlje skozi kontrolni oddajnik nazaj v prostor. V našem primeru obravnavamo kontrolni oddajnik kot zvočnik. Na koncu pa imamo tudi senzor, ki sporoča elektronski enoti pravilnosti in nepravilnosti. Ta senzor uravnava amplitudo glasnosti in fazno razliko med vhodnim signalom ter fazno obrnjenim signalom. [4]



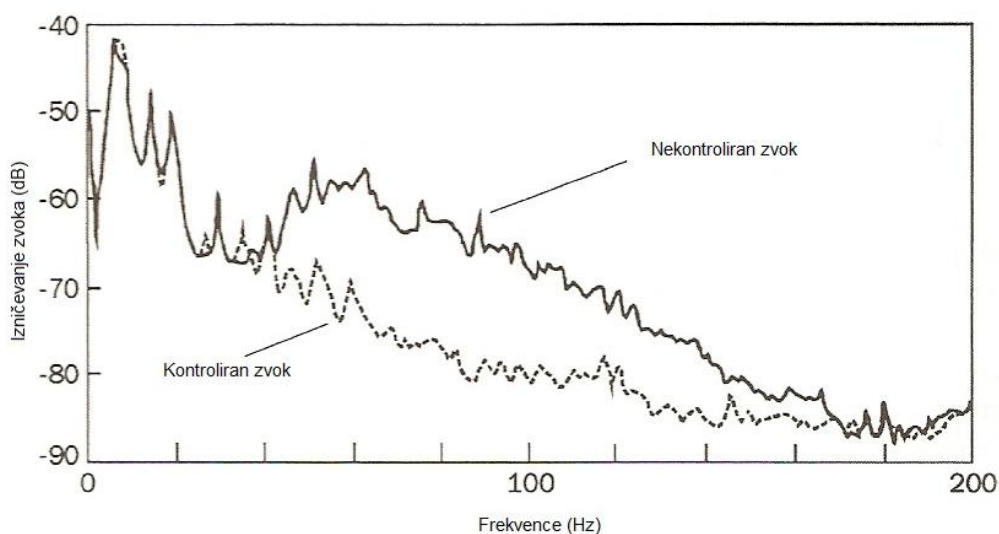
Slika 11: Prilagodljivo filtriranje (Hansen, 2001: str.13.)

Pri tem procesu je pomembno, da je čas poti signala od referenčnega senzorja do kontrolnega oddajnika manj od časa, ki ga potrebuje zvok. Da pa sistem praktično deluje, je potrebno kar nekaj dodatnih naprav dodati. Na sliki 12 vidimo, da je med referenčnim mikrofonom in naslednjo komponento vstavljen filter in A/D konverter. Filter poskrbi na grejo skozi samo frekvence nižje od 500 Hz, A/D konverter pa konvertira zvok iz analognega signala v digitalni signal. Obratno pa se zgodi pri vračanju zvoka, zato imamo napravo D/A konverter, kateri konvertira digitalni signal v analogni signal. Vmes med A/D in D/A konverterji so poleg adaptivnega algoritma, ki izračunava čas in fazno smer, postavljeni filtri, ki preprečujejo nezaželenim frekvencam, da preidejo skozi sistem. [4]



Slika 12: Prilagodljivo filtriranje z adaptivnim logaritmom (Hansen, 2001: str.15.)

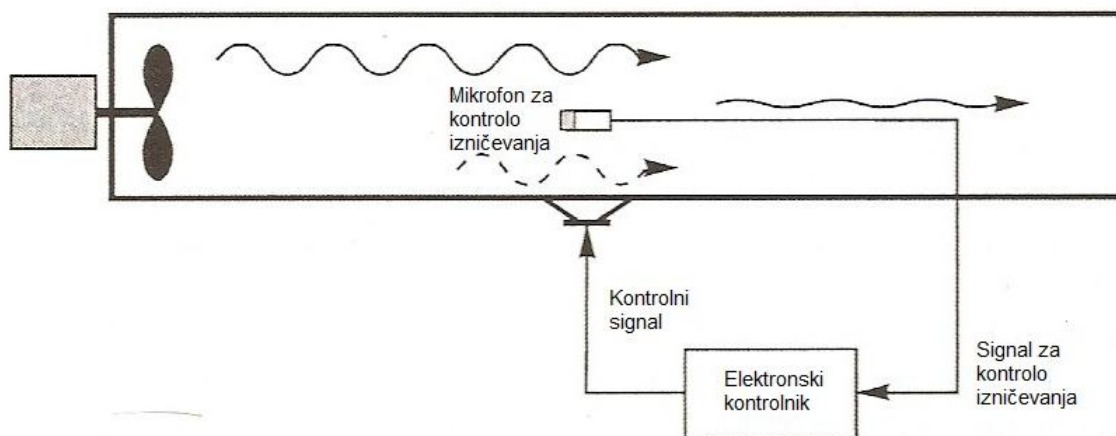
Četudi bi bila na terenu drugačna slika, bi princip ostal enak. Vseskozi se pa moramo zavedati, da smo do sedaj izračunavali in spoznavali eno dimenzijsko izničevanje zvoka. Če imamo tri dimenzijsko izničevanje zvoka, se zadeva matematično zakomplicira. Pri tridimenzijskemu izničevanju zvoka je enako veliko odvisno od sprejemnega referenčnega mikrofona in senzorja za javljanje napake. Zavedati pa se moramo, da je pri tridimenzionalnem izničevanju zvoka potrebno uporabljati večji sistem in več mikrofonov. Vedeti moramo tudi kakšen zvok bomo imeli in katere frekvence želimo izničiti. Poleg tega je pomembno tudi ali je zvok kontinuiren ali tranzialni. Sistem prilagodljivega filtriranja je bolj primeren za kontinuirne zvoke, ki trajajo bolj konstanto. [4]



Slika 13: Prikaz frekvenčnega razpona jakost izničevanja zvoka v cevi (Eriksson&Allie, 1989: str.15.)

3.3.2 Povratno kontroliranje

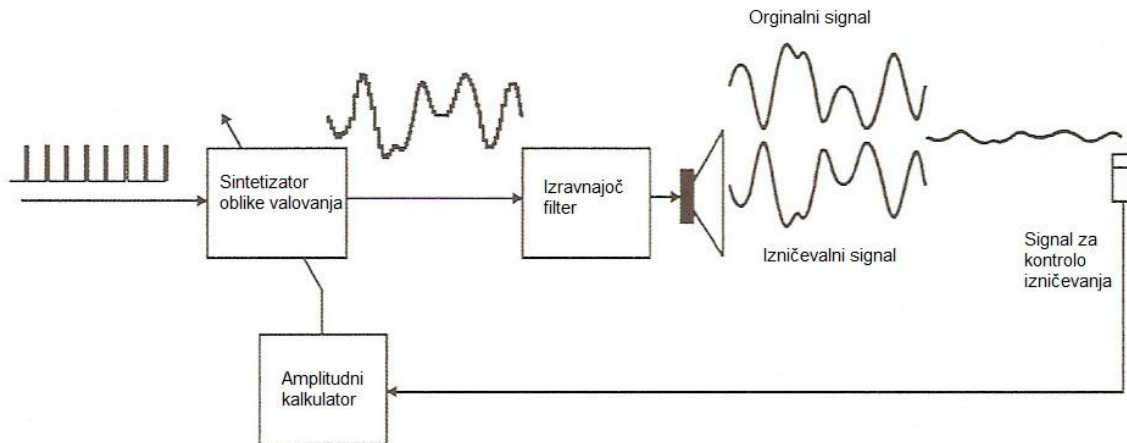
Sistem povratne kontrole se razlikuje od prejšnjega sistema po tem, da uravnava izničevanje zvoka samo s pomočjo mikrofona, ki leži med zvočnikom in prvotnim zvokom. Takšni sistemi so bolj primerni za tranzientne zvoke. Ta sistem mora biti zasnovan, da združuje fizični sistem in kontrolni sistem skupaj. Sistem deluje na področju izničevanja zvoka tako, da izhodni signal od zvočnika izničuje zvok, pri tem pa mora mikrofoni dobiti minimalni vhodni signal. Če ni tako, potem mikrofoni za kontrolo izničevanja pošlje signal procesorju in ta spremeni signal v zvočniku kot je prikazano na sliki 14. Da zmanjšamo zamik zvoka med zvočnikom in mikrofonom, moramo poskrbeti, da sta oba čim bolj skupaj. Če tega faktorja ne upoštevamo, verjetno ne dobimo zadovoljivih rezultatov. [4]



Slika 14: Povratna kontrola (Hansen, 2001: str.13.)

3.3.3 Valovna oblika pulsov

Valovna oblika pulsov deluje po enakem principu kot zgoraj opisana modela, le da ima ta pri vhodnem signalu merilec pulsov, kateri izmeri količino pulsa in s tem določi frekvenco. Nato frekvenco pošlje v sintetizator valovne oblike, ki pretvori frekvenco v signal, katerega pošlje v oddajno enoto, ki je v našem primeru zvočnik. Izničevalni mikrofoni je pri tem modelu enak in le-ta sprejema končni signal ter sporoča informacijo o zadovoljivem rezultatu amplitudni napravi, katera sporoča sintetizatorju valovne oblike o faznih premikih in jakosti amplitude kot kaže slika 15.

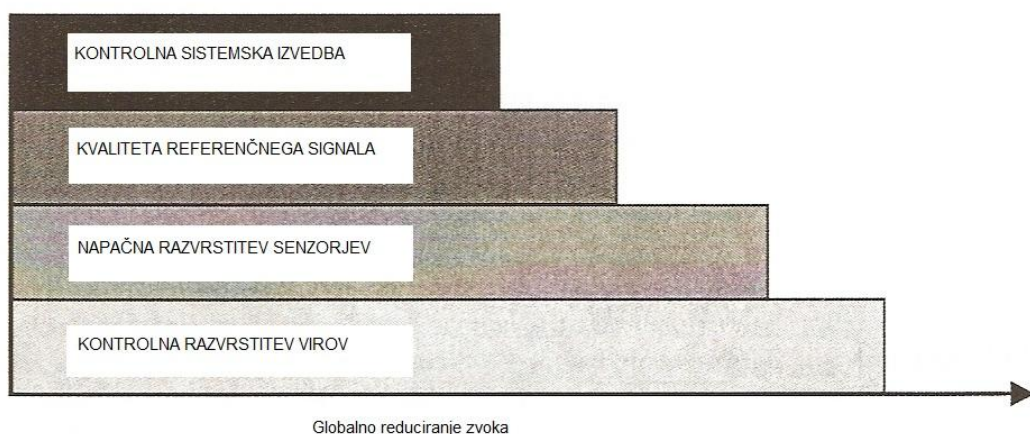


Slika 15: Kontrolnik valovne oblike pulsov (Hansen, 2001: str.13.)

3.3.4 Optimizacijski proces

Pri optimizaciji procesa želimo poudariti pomembnost vrstnega reda naprav in postavitve le-teh, kajti tudi če imamo sprejemne in oddajne naprave ter odlično programsko opremo nam le-ti ne bodo dali zelenih rezultatov brez prave postavitve. [4]

Najbolj pomembna je pravilna postavitve kontrolnih naprav, kar vključuje zvočnike in mikrofone. To pomeni, da v primeru napačne postavitve le-teh dobimo najslabše rezultate meritev. Pomemben faktor je tudi senzor, ki sporoča pravilnosti delovanja zvočnika ali mikrofona za kontrolo izničevanja in kvaliteta referenčnega signala, kar pomeni, da je vhodni signal čim bolj razločen in ima dovolj veliko amplitudo, ker ga je tako lažje obravnavati. Ostane nam še računalniški sistem, kateri sprejema od A/D konvertorja digitalni signal in mu zamenjuje fazo ter ga pošilja oddajni enoti ali zvočniku. Pri tem je pomembno, da je naprava oziroma sistem elektronike odporen na zunanje vplive kot so vremenski vplivi in vplivi okolja.



Slika 16: Prikaz vplivov komponent (Hansen, 2001: str.20.)

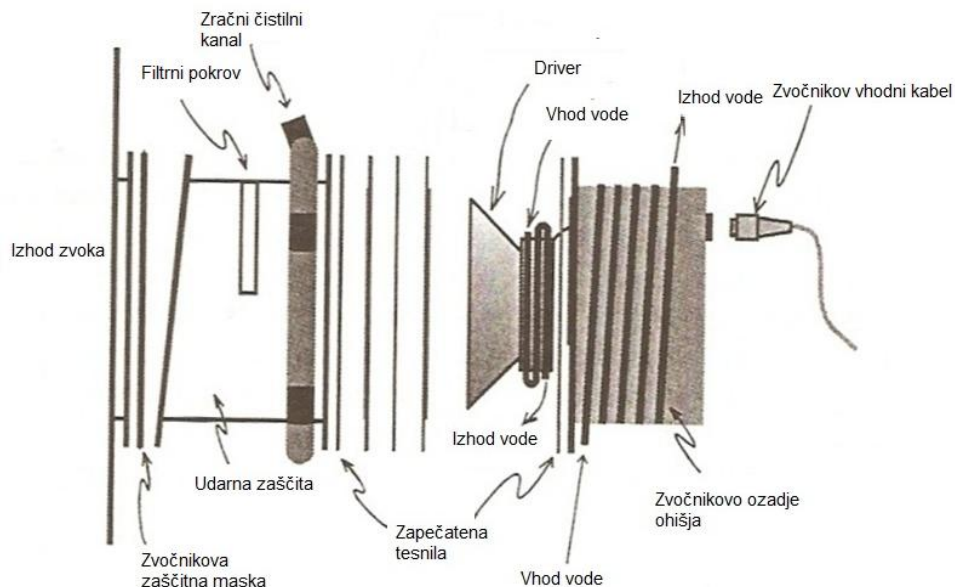
3.4 Kontrolni vir zvoka – zvočni oddajniki in zvočni sprejemniki

3.4.1 Zvočnik

Zvočnik je zadnja komponenta pri oddajanju zvoka, katera prevaja električno energijo v mehanično. Zvočnik je kompletni sistem, katerega sestavljajo izolirani zvočni generator, zvočna škatla in po potrebi kretnica. Izolirani zvočni generator je lahko visokotonec, srednjetonc ali bas.

Odkar je aktivno izničevanje zvoka postalo dejansko možno izvedljivo, je oblika zvočnika postala robustna predvsem zaradi zunanjih vplivov. Tehnologija zvočnika mora biti zasnovana v tolikšni meri, da bo zvočnik ostal več let nepoškodovan in kvaliteten ob vplivih umazanije, dežja, snega, vetrov, olja in drugih vplivov. Obstojeen mora biti tudi na vpliv temperature, saj v primeru, da je zvočnik zavarovan z aluminijasto škatlo, doseže tudi do 50°C. Dodaten problem nastane zaradi majhnega ozadja ohišja zvočne skrinje, kajti zvočnik se pri oddajanju nizkih frekvenc in visoki jakosti pregreje in temu sledi pregretje izoliranega zvočnega generatorja, razen, če je zagotovljeno ustrezno hlajenje le tega. Komercialna programska oprema omogoča izdelavo ohišja za proizvodnjo maksimalne moči v ozkem frekvenčnem območju ali pa manjšo moč na večjem frekvenčnem območju. Ohišja zvočnika po navadi potrebujejo manjše luknje za preprečevanje kopičenja vode, ki je posledica konstantnega segrevanja in ohlajevanja ohišja, zlasti zunanjih. Luknje morajo biti dovolj majhne, da ne vplivajo na togost ohišja na območju frekvenc oziroma morajo biti vključene v izračun ohišja. Luknje so zaželeno tudi zaradi izenačenja statičnega pritiska na zunanji in sprednji strani zvočne skrinje. Ko obravnavamo nizke frekvence v izračun ohišja, ne smemo zanemariti teh lukenj. [4]

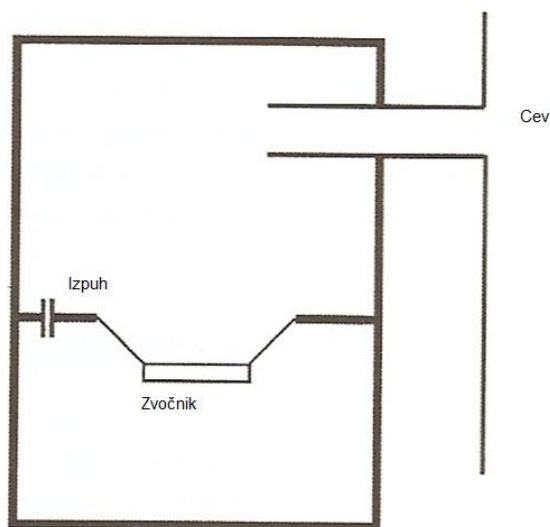
Dizajn zvočne skrinje, ki bo ustrezala vsem pogojem je zasnoval Hansen leta 1996. Na sliki 17 vidimo sestavo zvočne skrinje, katera je bila testirana na višini 80m, izpostavljena temperaturnim razlikam od 100 °C do 180°C in raznoraznim usedlinam. [4]



Slika 17: Shema zvočne skrinje (Hansen, 2001: str.70.)

Zvočna skrinja je hlajena s pomočjo ohlajenega zraka in vode, katera je speljana po bakrenih ceveh okrog magneta. Za membrano je postavljenih vrsto zaščitnih filtrov, ki preprečujejo zmrzovanje membrane in nabiranje umazanije. [4]

Nekoliko drugačen sistem je bil uporabljen v ventilacijskem sistemu stolpnice, v katerega je raziskovalec Elliott postavil popolnoma odprt zvočnik z izhodom v ventilacijski sistem in s to metodo zmanjšal 30 – 40 Hz hrupa. [4]



Slika 18: Odprt zvočnik v ventilacijskem sistemu (Hansen, 2001: str.71.)

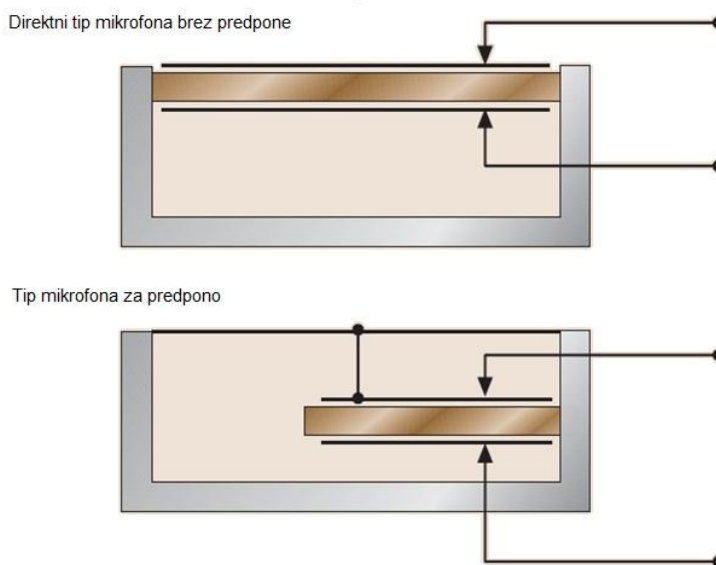
3.5 Referenčno zaznavanje

3.5.1 Mikrofon

V današnji moderni tehnologiji kvaliteta frekvenc, katere pridobimo z mikrofonom, bodisi referenčni signal ali izničevalni signal nima takšnega pomena, ker to amplitudo pošljemo v ojačevalec in skozi filtre, ki signal obdelajo za naše potrebe. Priporočljivo je, da izberemo relativno poceni mikrofone. Najbolj priporočljiva tipa mikrofonov sta piezoelektrični in polarni kondenzator. Če so uporabljeni električni mikrofoni, je bolje kupiti malo dražji mikrofon, ki je bolj temperaturno odporen, saj tako vhodni signal v kontrolni sistem ni odvisen od temperature. [4]

3.5.1.1 Piezoelektrični mikrofon

Pri piezoelektričnem mikrofону je poglobitveni del kristal. Zvok pride do prepone, katero napne ali pa odpne. Predpona reagira in povzroči električni impulz, katerega spremenljivka deluje kot električni generator. Dobra lastnost te vrste mikrofonov je, da so relativno poceni, njihova slabost pa, da nam dajejo omejeno zvočno sliko. [6]



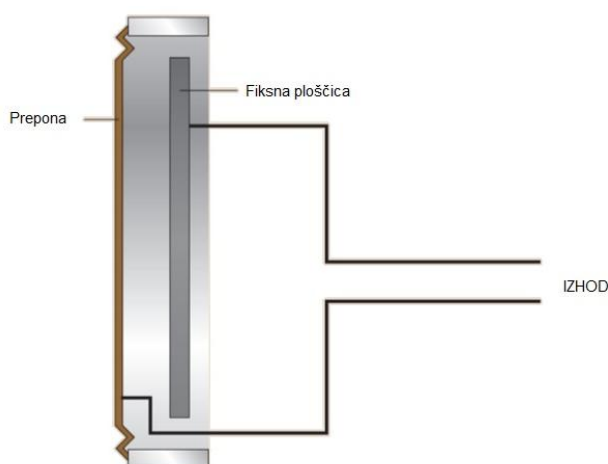
Slika 19: Dve vrsti piezoelektričnih mikrofonov (Rossing, 2007: str.759.)

3.5.1.2 Kondenzatorski mikrofoni

Kondenzatorski mikrofoni so eni izmed najkvalitetnejših in najdražjih mikrofonov. Sestavlja ga kondenzator, ki je zaporedno zvezan z uporom in virom napetosti. Ima dve elektrodi izmed kateri je ena kovinska opna ki resonira ob zvočnih nihajnih in hkrati spreminja razdaljo med drugo, masivno elektrodo. Pri tem nihanju se spreminja napetost na upor. Kondenzatorski mikrofoni zato potrebujejo predojačevalnik, ki je običajno vgrajen v ohišje mikrofona in potrebuje dodatno napajanje. [5]



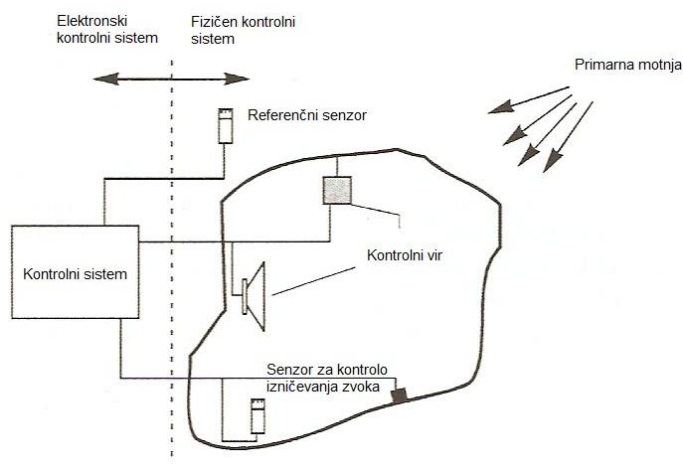
Slika 20: Notranjost kondenzatorskega mikrofona Oktava 319
(http://sl.wikipedia.org/wiki/Kondenzatorski_mikrofon)



Slika 21: Shema kondenzatorskega mikrofona (Rossing, 2007: str.758.)

3.6 Izničevanje zvoka v odprtih prostorih

Zvok, katerega izvor prihaja iz odprtih prostorov, je bolj težavno nadzorovati, meriti ali izničevati. Celotni sistem za izničevanje zvoka v odprtih prostorih delimo na dva glavna sestavna dela. Prvi del imenujemo fizični kontrolni sistem in drugi del elektronski kontrolni sistem. [6]



Slika 22: Aktivni kontrolni sistem za reduciranje zvoka v odprtih prostorih (Hansen, 2001: str.124.)

Fizični kontrolni sistem sestavljajo kontrolni izvori zvoka, v našem primeru zvočniki, senzori za kontrolo izničevanja zvoka, mikrofoni in v nekaterih primerih vibratorji. Izvori zvoka so potrebni za fizično motnjo izvirnega zvoka, prav tako pa tudi senzori za uravnavanje zvočnikov, da dobimo želeni rezultat. Če upoštevamo poslano informacijski kontrolni sistem, potem je potreben še referenčni senzor kot tretja komponenta. Elektronski kontrolni sistem pa sestavlja naprava oziroma računalnik, ki oddaja signal izvorom zvoka. Glavni cilj pri odprtih prostorih je zmanjšanje akustične potencialne energije oziroma povprečnega kvadratnega zvočnega tlaka na neko površino.[6]

V teoriji vemo, da vsak zvok ustvari neko energijo. V splošnem pa se energije ne da izničiti, zato se lahko vprašamo, kam energija izgine pri aktivnem izničevanju zvoka. Za odgovor moramo podrobneje pogledati problem zvočnega oddajanja. [4]

Glasnost zvoka pa lahko kontroliramo tudi na malo drugačen način, in sicer z vibracijskim virom. Ta ima lahko dva učinka. Prvi učinek je, da se odziva na nizke frekvence, ki prihajajo od nezaželenega vira zvoka in reducira njihov nivo vibracije. To lahko pomeni, da jih učinkovito ne izničuje, ampak samo blaži njihov vpliv. Drugi učinek pa je, da spreminja relativno amplitudo in fazo strukture oblike. To lahko vpliva na reduciranje energije, katera se ustvari pri zvoku. [6]

4 IZNIČEVANJE ZVOKA V GRADBENIŠTVU

4.1 Aktivne protihrupne ograje

Z razvojem tehnike se izpopolnjujejo raznorazni sistemi na vseh tehničnih področjih. Tudi v gradbeništvu in prometu se je tehnika v zadnjem času povzpela. Ideja o aktivnem izničevanju zvoka počasi dobiva podobo tudi pri aktivnih protihrupnih ograjah. V raznoraznih literaturah opisujejo pozitiven učinek izničevanja zvoka le do 500 Hz, sam pa sem v praktičnih preizkusih prišel do ugotovitve, da se frekvence izničujejo tudi na drugih frekvenčnih območjih.

4.2 Absorberji zvoka

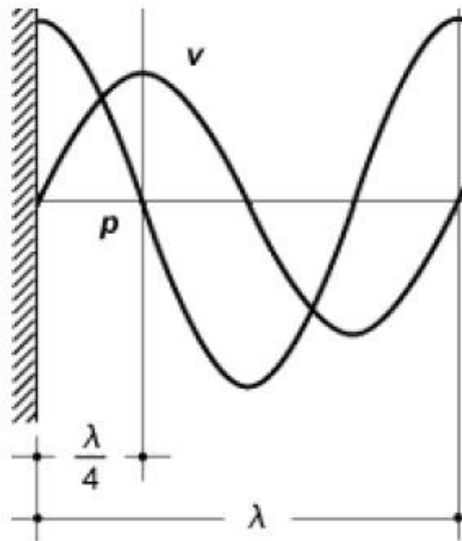
Absorberji zvoka so pogosto iz materiala, ki ima vlaknasto ali celično strukturo. Taka struktura omogoča, da absorberji vpijajo zvok in se glasnost zvoka zmanjša. Absorberji delujejo na različnih frekvenčnih območjih, poznamo širokopasovne ter ozkopasovne. Tako absorber spreminja kinetično energijo zvoka v toplotno, kar pa ne pomeni, da mi to spremembo temperature občutimo. Poznamo več vrst absorberjev: [10]

- porozni absorberji,
- kotni absorberji,
- membranski absorberji,
- membranski perforirani absorberji,
- membranski mikroperforirani absorberji,
- Helmholtzev resonatorski absorber,
- cilindrični in polcilindrični absorberji,
- aktivni elektronsko uravnavani absorberji. [10]

4.2.1 Porozni absorberji

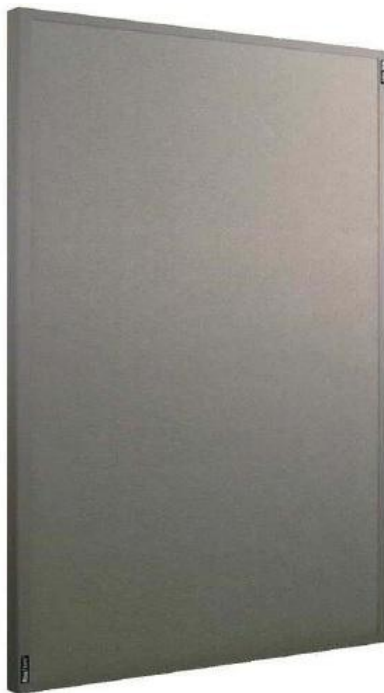
Najbolj pogosti so porozni absorberji, kateri so iz vlaknastih materialov kot so kamena volna, steklena volna, bomažne, poliestrske ali odrtocelične pene. [12]

Absorber najbolj učinkovito deluje, ko je oddaljen od zadnje površine za $\frac{1}{4}$ valovne dolžine – λ izbrane frekvence. [10]



Slika 23: Optimizacija zvočnega žepa (N. Petkovič, 2009: str. 30.)

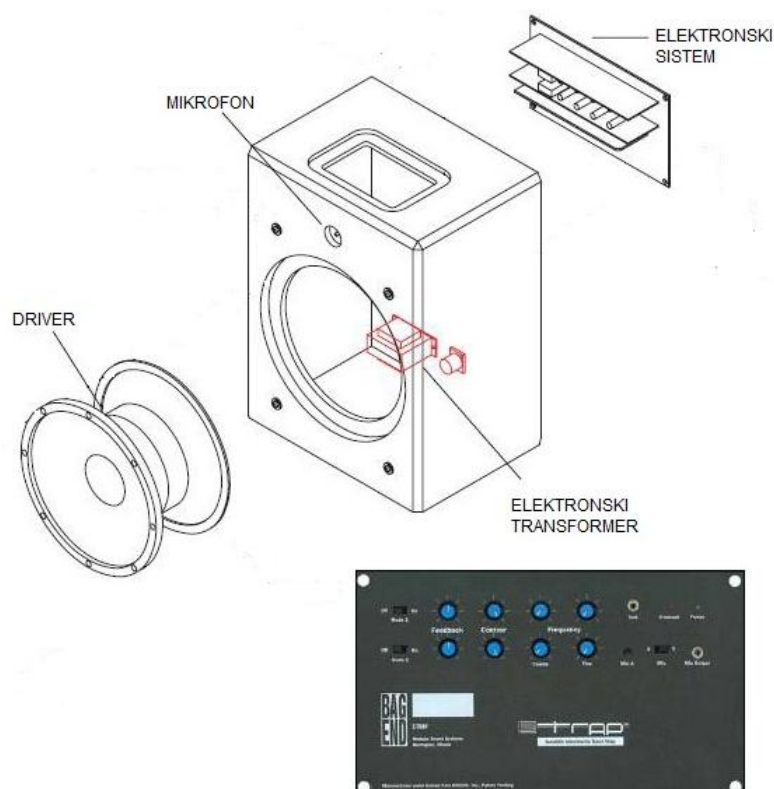
Pri tem oznaka p pomeni zvočni pritisk, v hitrost zvoka ter λ valovna dolžina. V praksi je absorber oddaljen od zadnje površine za toliko, kolikor znaša absorberjeva debelina. Na sliki 24 vidimo primer notranjega absorberja. [10]



Slika 24: Primer notranjega poroznega absorberja (N. Petkovič, 2009: str. 30.)

4.2.2 Aktivni elektronsko uravnani absorberji

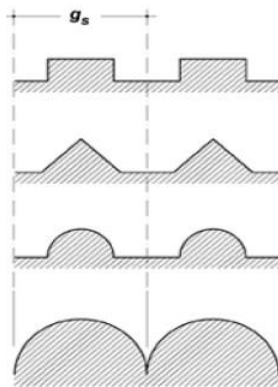
Pri aktivnih protihrupnih ograjah je ključni del tudi aktivni elektronsko uravnani absorber. Pri le-tem je odvisno kakšne kvalitete je sam izolirani zvočni generator in kako široko frekvenčno območje obravnava. Na zunanji videz je podoben zvočniku, le da ima ta že vstavljen mikrofona. Mikrofona sprejema zvok, ki ga zvočnik z nasprotno fazo izničuje. Ta vrsta absorberjev je priporočljiva le za nižje frekvence. [10]



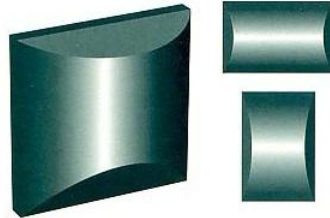
Slika 25: Shematski prikaz aktivnega absorberja (N. Petkovič, 2009: str. 41.)

4.3 Difuzorji zvoka

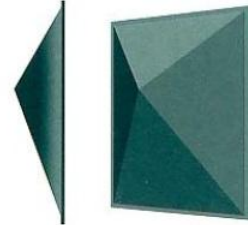
Namen difuzorjev je, da zvok tem bolj razpršijo in s tem se prerazporedijo refleksije po prostoru. Difuzorji zvočno energijo poskuša odbijati v čim bolj različne smeri kar se le da. V bistvu je difuzor vsak predmet ali ovira v prostoru v katero se zvok zaleti. Poznamo več vrst difuzorjev, kateri se razlikujejo po obliki in vrsti materiala. Na sliki 26 vidimo nekaj najbolj pogostih oblik difuzorjev. [10]



Različne
geometrijske strukture



Polcilindrični elementi



Piramidalni difuzorji

Slika 26: Oblike difuzorjev (N. Petkovič, 2009: str. 42.)



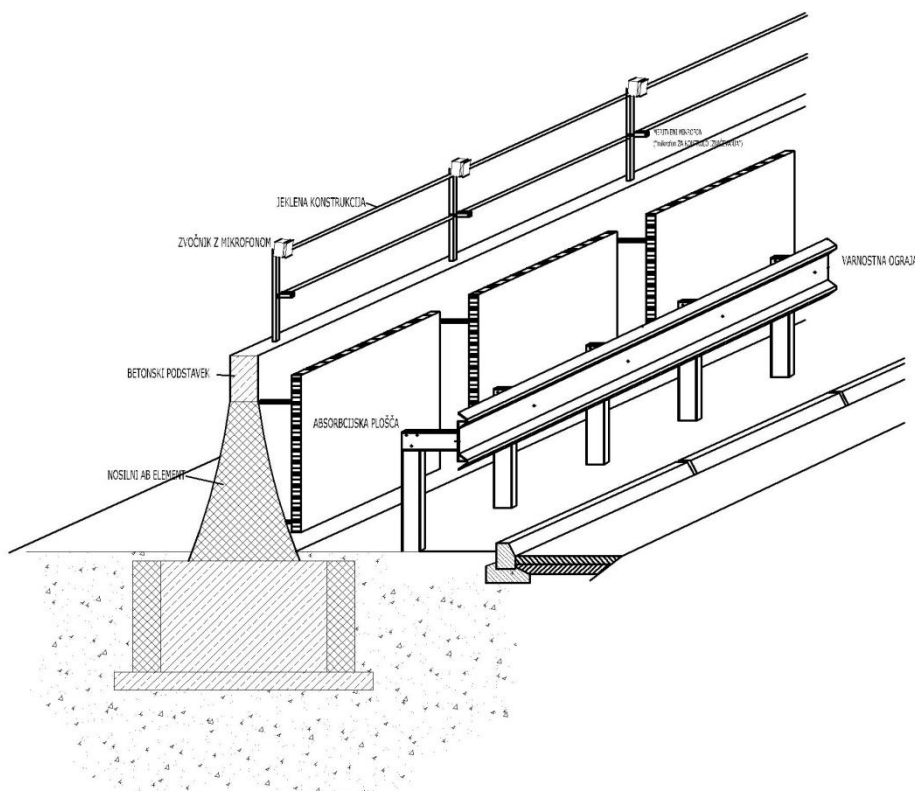
Slika 27: Vrsta difuzerjev (N. Petkovič, 2009: str. 47.)



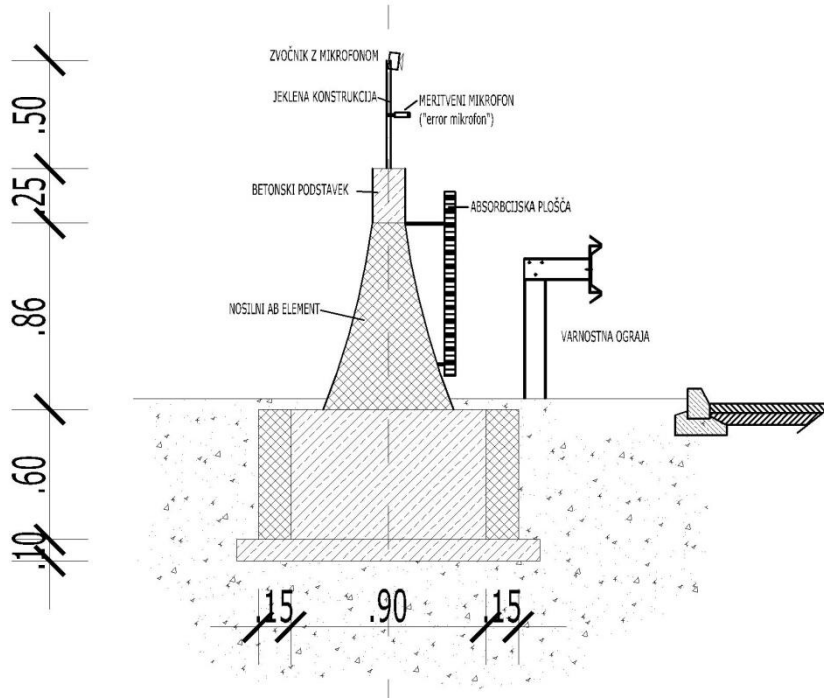
Slika 28: Vrsta difuzerjev (N. Petkovič, 2009: str. 47.)

4.4 Idejna zasnova aktivne protihrupne ograje

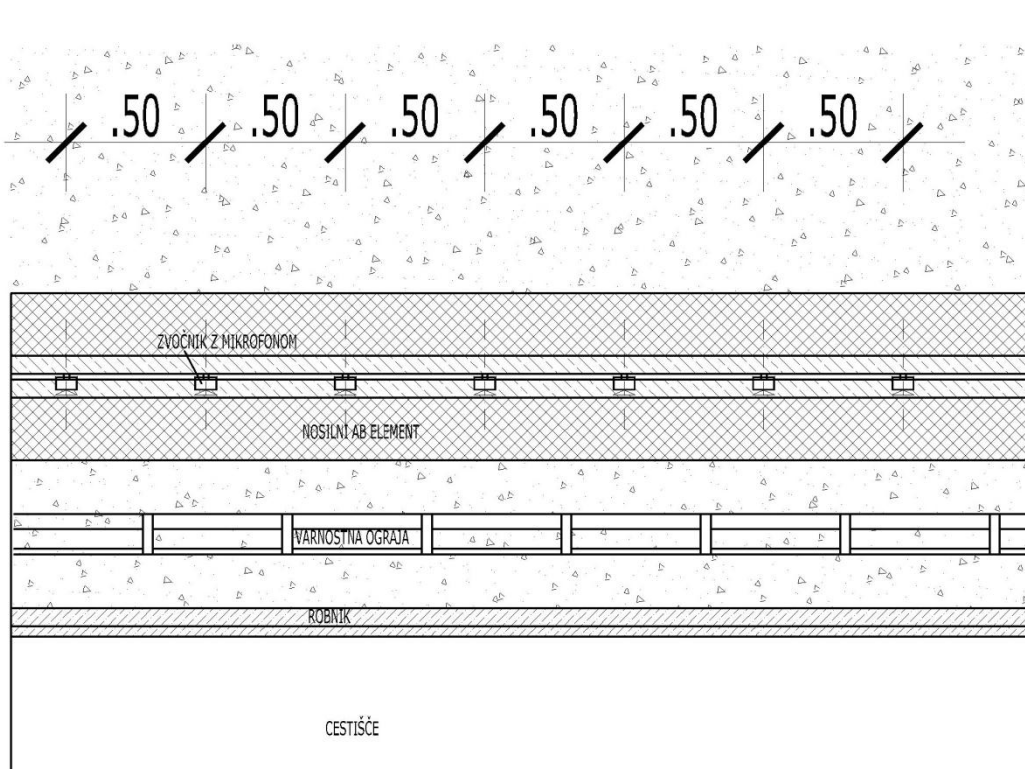
Višina ograje je odvisna od okolice in vrste prometnice. Spodnji del ograje (do višine 2m) bi ostal iz masivnega materiala kot je beton in bi prevzemal funkcijo nosilnega AB elementa. Zgornji del bi sestavljala jeklena konstrukcija, na katerem bi bili pritrjeni mikrofoni in zvočniki. Spodnji del protihrupne ograje bi prevzemal nižje frekvence, katere je težje kontrolirati in jih izničevati. Zato bi na masivni del pritržil absorpcijski material na jeklene nosilce, kateri bi dušili zvok nizkih frekvenc. Pri tem imamo v mislih frekvenčno območje do 400 Hz. Ta material je montiran na plošče, ki morajo biti oddaljene od masivnega dela protihrupne ograje za približno 5 cm do 10 cm oziroma toliko kolikor je debelina plošče. Še boljša varianta pa bi bila, če bi bile te plošče v rahlem naklonu proti cestišču.



Slika 29: Aktivna protihrupna ograja – pogled



Slika 30: Aktivna protihrupna ograja – prerez



Slika 31: Aktivna protihrupna ograja – tloris

4.5 Optimizacija v današnjem času

V vseh gradbenih pogledih moramo na investicije gledati realno oziroma stroškovno izvedljivo. Po moji oceni se bi pri aktivnih protihrupnih ograjah cena razlikovala od običajnih protihrupnih ograjah v samem elektronskem sistemu. Cena nosilne konstrukcije bi ostala približno enaka, absorpcijski paneli so v obeh primerih upoštevani, le da jih je pri aktivnih protihrupnih ograjah manj. V kolikor pa se spustimo v ceno elektronike, pa pridemo do mrtve točke, kajti teh sistemov zaenkrat še ni na tržišču. Poizvedoval sem v raznih podjetjih, katera mi niso znala podati niti ocene stroškov teh aparatov. Pri vsakem izmed podjetij sem dobil podoben odgovor, kateri se je nanašal na sam projekt, katerega bi bilo potrebno izdelati, kar je seveda razumljivo. Zvočniki in mikrofoni tega ranga se izdelujejo po naročilu. Odgovorili so tudi, da če bi se projekt začel izvajati in bi bile znane dejanske značilnosti in količine materiala, bi se verjetno tudi sama podjetja angažirala in razvijala v tej smeri.

5 PRAKTIČNI DEL – Meritve izničevanja zvoka

5.1 Namen preizkusa

S svojim preizkusom želim ugotoviti izničevanje zvoka pri različnih frekvencah in različnih frekvenčnih spektrih. Preizkusil bom več frekvenc posamezno in ugotavljal njihovo izničevanje pri različni stopnji glasnosti. Nato bom postopek ponovil z več vrstami spektrov frekvenc in rezultat skušal primerjati s spektrom frekvenc, ki se pojavi pri zvoku prometa na cestišču. Predvidevam, da rezultat ne bo popolnoma realen, saj bom pri preizkusu uporabljal opremo, katera mi je na voljo. Predvsem pa me niti ne zanima natančnost preizkusa temveč, na katerem frekvenčnem območju je izničevanje zvoka najbolj učinkovito in kje bi bilo lahko izničevanje dejansko uporabno.

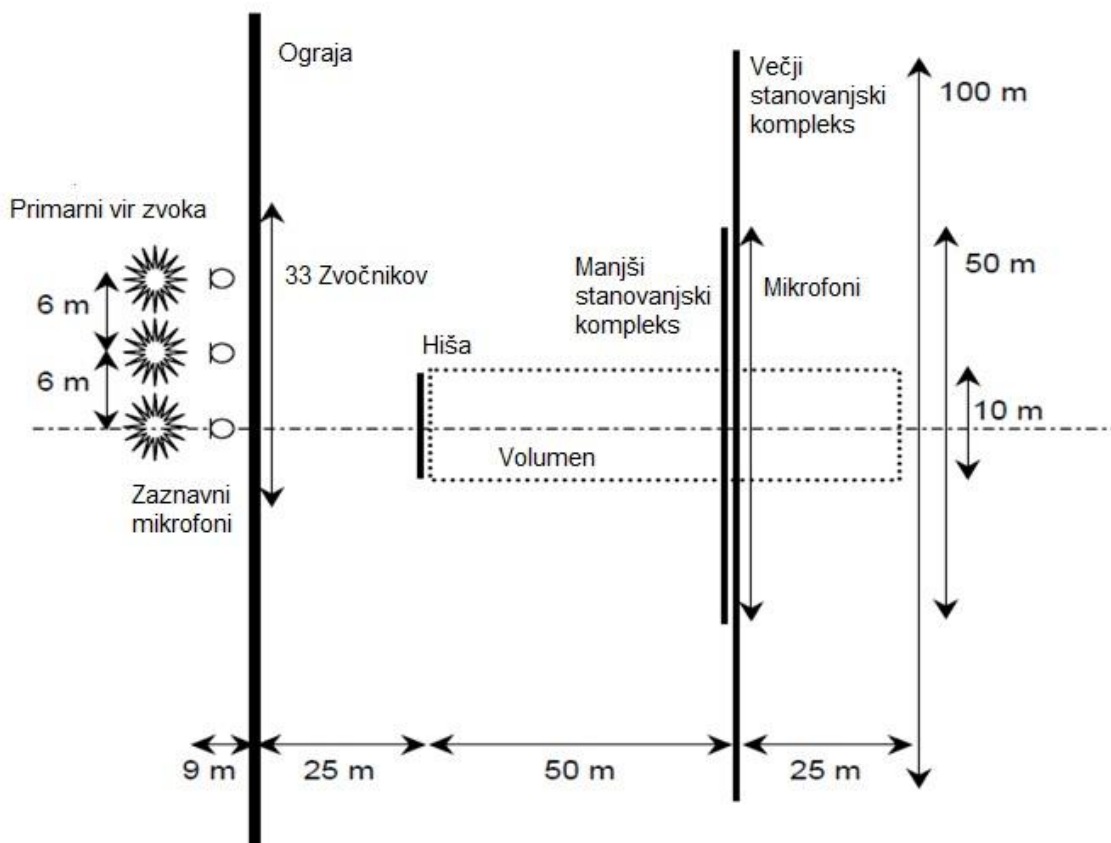
5.2 Preizkus opravljen na Nizozemskem

Leta 2001 je so Nizozemskem raziskovali program aktivnega izničevanja hrupa. Njihov glavni cilj je bil zmanjševati vplive hrupa za 5 dB na določenih lokacijah v senci pregrade.

V preizkusu so izbrali tri področja za merjenje hrupa:

- stanovanjsko hišo oddaljeno 25 m od protihrupne ograje,
- stanovanjski kompleks oddaljen 75 m,
- volumen od 25 – 100 m za protihrupno ograjo. [9]

Glavni viri hrupa so postavljeni vedno 9m pred ograjo na pozicijah 0,6 in 12m v smeri vožnje. Zvočniki sekundarnega zvoka so postavljeni na vrhu pregrade oziroma na razmikih 0,68 m. kontrolni mikrofoni za izničevanje zvoka so bili nameščeni na medsebojni razdalji 0,34 m. Snemalni oziroma zaznavni mikrofoni pa so nameščeni pred ograjo. [9]



Slika 32: Postavitev in situacija preizkusa (M.Krutzen, 2002: str.2.)

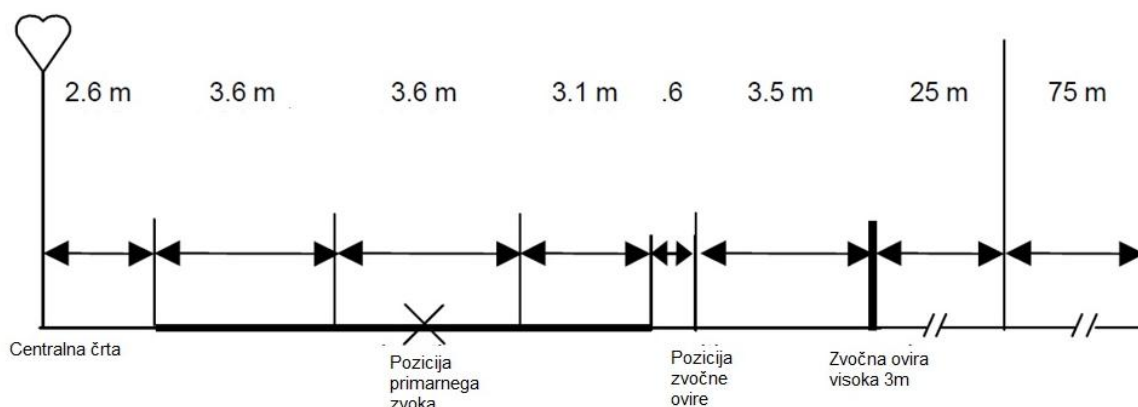
Vrednosti zmanjšanja hrupa z aktivnim sistemom za omenjene pozicije so podane v naslednji tabeli: [9]

Preglednica 3: Prikaz zmanjšanja hrupa na določenih točkah preizkusa (M.Krutzen, 2002: str.2.)

Višina ograje	Stanovanjska hiša na razdalji 25m	Stanovanjski kompleks na razdalji 75m (1-4 nadstropje)	Stanovanjski kompleks na razdalji 75m (7-10 nadstropje)	Volumen na razdalji 25 – 100m
3 m	10 dB	5,5 dB	1,9 dB	0,6 dB
6 m	13 dB	5,9 dB	2,5 dB	2,2 dB

Na simulacijo vpliva aktivnih ovir deluje veliko parametrov. Za natančni preizkus so bili nekateri parametri opredeljeni vnaprej, drugi parametri pa so bili v času preizkusa spremenjeni zaradi razumevanja vpliva in pomena le-teh parametrov.

Zvočni efekt cestnega prometa se v odvisnosti s časom spreminja. Tu govorimo o več virih zvoka, kajti na cestišču je več vozil, katera oddajajo zvočni signal. Pri simulaciji je bilo to poenostavljeno na točkovni vir zvoka, kateri je bil postavljen na sredini desne strani cestišča v višini 10 cm. Simulacije so bile izvedene za določeno cesto kot prikazuje slika 33. [9]

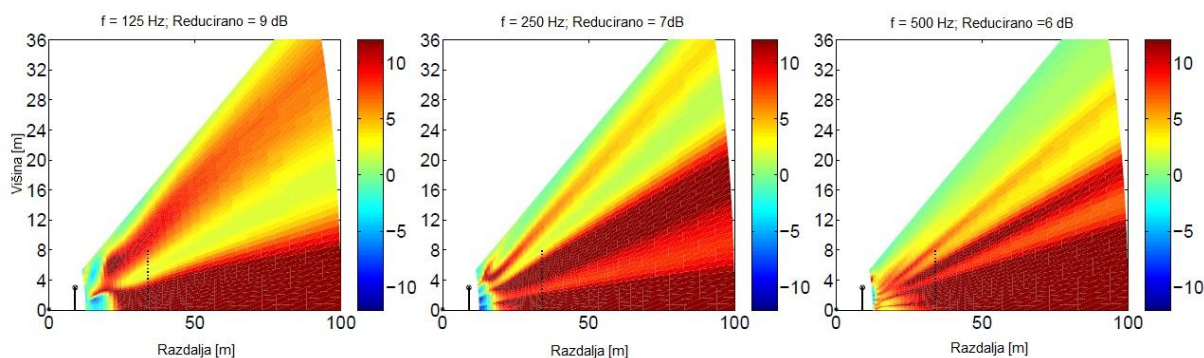


Slika 33: Postavitev in situacija preizkusa za določeno cestišče (M.Krutzen, 2002: str.7.)

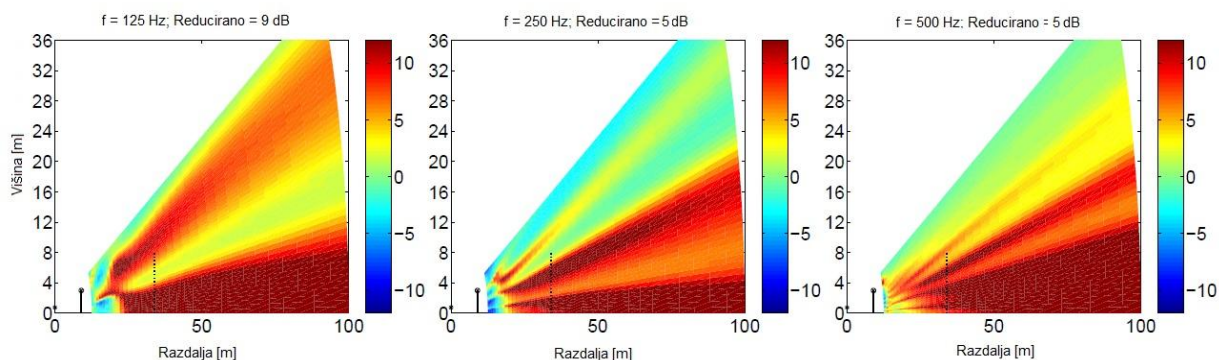
Prvotno so vir zvoka obravnavali na višini 10 cm od cestišča, kar je primerljivo s pozicijo zvoka osebnega avtomobila. Z barvno shemo je prikazano izničevanje zvoka. Rdeča barva pomeni stopnjo izničevanja zvoka, zelena barva nam pove, da se v tem območju nič ne zgodi in modra barva pomeni ojačitev zvoka.

Kot vemo je zvok tovornih vozil drugače pozicioniran na cestišču, zato so izvor zvoka postavili tudi na višino 75 cm, ki odraža velikost in višino tovornih vozil.

Preizkus se je izvajal z različnimi spektri frekvenc in povzemal povprečne vrednosti izničevanja zvoka. [9]

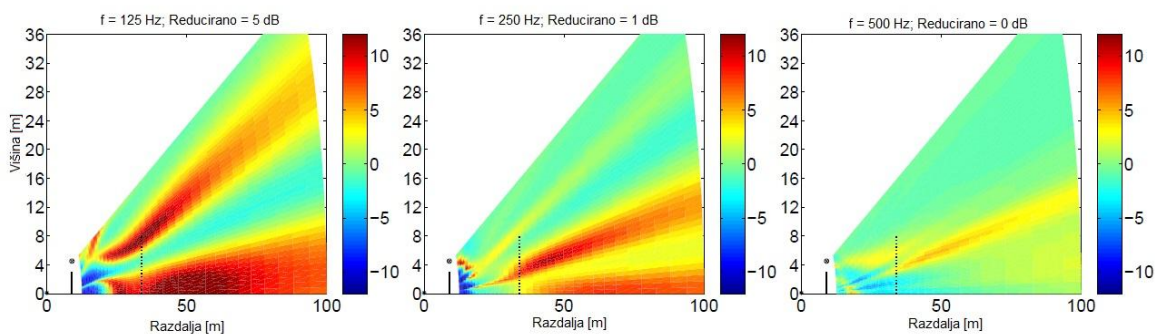


Slika 34: Prikaz izničevanja zvoka za pri izvoru zvoka na višini 10 cm (M.Krutzen, 2002: str.9.)

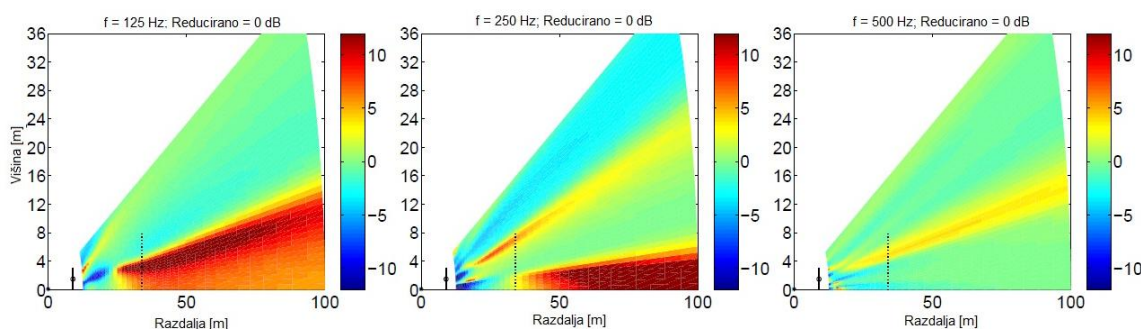


Slika 35: Prikaz izničevanja zvoka za pri izvoru zvoka na višini 75 cm (M.Krutzen, 2002: str.9.)

Pri preizkusu so imeli anti-zvok oziroma fazno zamenjani zvok na višini protihrupne ograje 3,0 m. Zanimalo jih je, kako vpliva pozicija anti-zvoka na izničevanje zvoka. Preizkus so ponovili in postavili ant-zvok na višino 4,5 m in 1,5 m. [9]



Slika 36: Prikaz izničevanja zvoka za pri višini anti-zvoka 4,5 m (M.Krutzen, 2002: str.10.)



Slika 37: Prikaz izničevanja zvoka za pri višini anti-zvoka 1,5 m (M.Krutzen, 2002: str.10.)

Iz grafov lahko razberemo, da je pozicija anti-zvoka najbolj primerna na višini same protihrupne ograje. Vrh je tako teoretično najbolj pomemben del protihrupne ograje. [11]
Vpliv na izničevanje zvoka ima tudi višina protihrupne ograje. Za test so uporabili ograje višine 3 m, 4,5 m in 6 m. [9]

5.3 Izničevanje zvoka v domačem studiu

Izničevanja zvoka sem se lotil tudi v domačem studiu. V preizkusu pa me je zanimala dejanska razlika izničevanja zvoka pri pogojih, ki so mi bili na voljo. Preizkus sem opravljal v prostoru velikosti 2,25 m x 3,70 m, izolacijsko opremljenem za snemanje glasbe. Na stenah sem imel panele velikosti 1m x 1m, ki so vsebovale 5 cm steklene volne in peno v obliki piramid v debeline 4 cm.



Slika 38: Studio



Slika 39: Postavitev zvočnika in v ozadju izolacija za preprečevanje odmeva zvoka

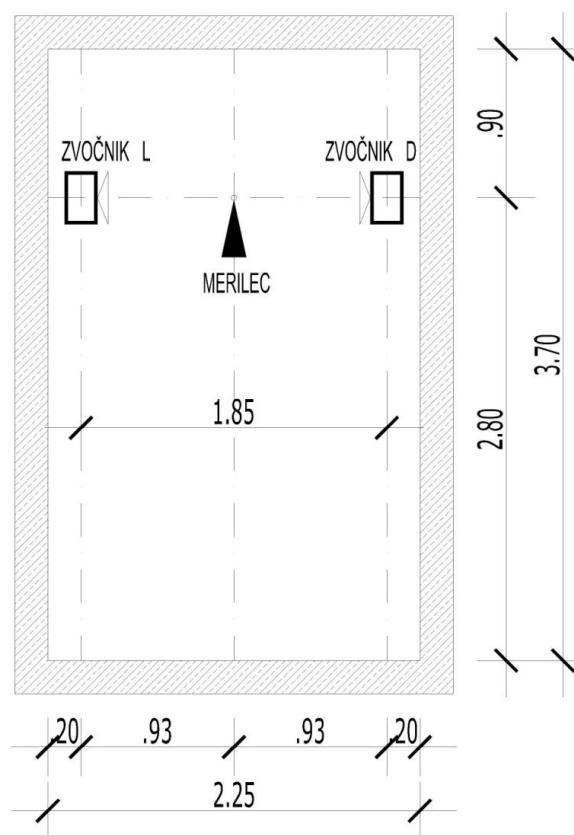
Uporabljal sem programsko opremo Cubase 5 in Wavelab 5, za snemalno in zvokovno obdelavo pa snemalno napravo M-audio project mix I/O, katera vsebuje tudi pred-ojačevalce. Za kontrolo jakosti zvoka in merjenje razlik glasnosti zvoka, sem imel napravo proizvajalca Bruel&Kjaer, model mediator 2238, iz katerega sem lahko natančno odčitaval dobljene rezultate.



Slika 40: Merilec glasnosti zvoka Bruel&Kjaer mediator 2238 (<http://www.bksv.com/>)

Frekvenčni razpon merilca je od 20 Hz do 12,5 kHz in ima kondenzatorski mikrofoni, kar še poveča njegovo natančnost merjenja. [8]

Merilno napravo glasnosti sem postavil na sredino sobe, katero sem določil z natančno meritvijo. Na vsako stran sem postavil zvočnik kot prikazujejo slike.



Slika 41: Skica postavitve merilne naprave, zvočnikov in mere sobe



Slika 42: Prikaz postavitve merilne naprave ter zvočnikov

Ozadje zvočnikov sem dodatno izoliral s peno iz piramid in stekleno volno, da bi čim bolj preprečil odbojev zvoka.

Izdelal sem si merilno tabelo za vpisovanje izmerjenih rezultatov. Za različno glasnost vira zvoka sem si ustvaril skalo s 13 stopnjami glasnosti v odvisnosti od linijskega signala, katera

je stopenjsko razporejena po gumbu za upomost kanala na mešalni mizi in hkrati v programski opremi. Trinajsta stopnja je najglasnejša in v praksi neuporabna, saj tam linijski signal preobremenimo, je pa res, da so bile pri preizkusu amplitude relativno nizke in s tem nisem proizvedel popačenja zvoka, sem pa dosegel večjo glasnost in s tem v pričakovanju tudi največje izničevanje zvoka. Pri merjenju vsake frekvence pri različnih glasnostih, sem si zadal interval 10 sekund, katerega sem naravnal na napravi mediator 2238. Po časovnem intervalu mi je naprava podala maksimalno izmerjeno glasnost in povprečno glasnost. Ker sem imel frekvenčne zvoke posnete na konstantni ravni, sem zanemaril maksimalno izmerjeno glasnost. To lahko dodatno obrazložim s trditvijo, da je pri enakomernih konstantnih ravneh glasnosti maksimalna glasnost v bistvu prizvok, ko vključimo naprave in izključimo naprave.



Slika 43: Prikaz programske nastavitve kanalov

Vsak vnaprej pripravljen zvočni posnetek z določeno frekvenco sem najprej vstavil v program in ga kopiral, da sem dobil dva identična posnetka frekvence. Njuna panoramska zasnova je bila obakrat »center« oziroma sredinsko poravnana. Nato sem program predvajal in meril glasnost na sredini sobe oziroma na sredinski točki med zvočnikoma. To glasnost sem meril na 13 stopnjah kot je zapisano v preglednicah. Nato sem kanala postavil na način »stereo«, kar pomeni, da sem prvemu kanalu dal panoramo strogo levo in drugemu kanalu strogo desno ter spet meril glasnost na vseh stopnjah glasnosti. Po teorijah zvoka bi se mi glasnost zvoka med prvima dvema poskusoma v povprečju morala zmanjšati za 3 dB. Pri merjenjih se je to v večini primerov dogajalo, tako da skupno lahko povzamem, da sem dobil želeni in pričakovani rezultat v tem sklopu preizkusa.

S panoramo sem dobival rezultate zmanjševanja jakosti zvoka. Oba kanala sta imela enako fazno sliko zato pri tem poskusu ni bilo prisotno izničevanje zvoka.

Naslednji preizkus pa je bil najpomembnejši, saj se enemu izmed kanalov zamenjal fazo. V tem poskusu pa sem opazoval izničevanje zvoka. Tako sem glasnosti zvoka meril na sredini med zvočnikoma, kjer se faze sekata. V tej točki bi se glasnost zvoka teoretično morala izničiti ali zmanjšati. Moramo se zavedati, da ni vedno nujno, da se glasnost zvoka zmanjša ravno pri obratnih fazah, kajti lahko se razdalja med zvočnikoma pri določenih frekvencah ravno ujame s fazama in je glasnost pri enakih fazah manjša kot pri različnih fazah.

Preizkus sem naredil z več različnimi frekvencami in frekvenčnimi spektri. Primerjal sem izničevanje glasnosti pri eni sami frekvenci in izničevanje glasnosti pri spektru več frekvenc. Postopek in sam prikaz rezultatov sem podal v preglednicah ter z grafikoni, podrobnejši rezultati preizkusov pa so podani v prilogah.

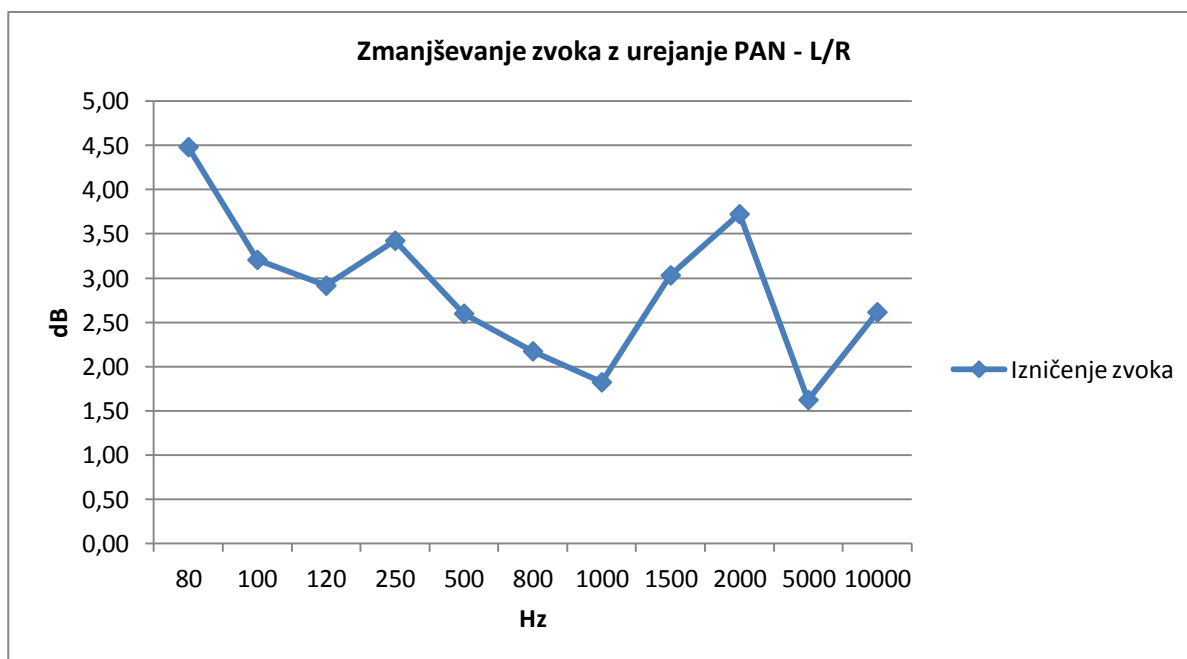
Preglednica 4: Zmanjšanje / Izničenje zvoka pri posameznih frekvencah

ŠT. PREIZKUSA	VRSTA PREIZKUSA OPIS	ZMANJŠANJE / IZNIČENJE ZVOKA	
		PAN C / LR [dB]	LR/LR (zamenjani fazi) [dB]
1.	80 Hz	4,48	4,31
2.	100 Hz	3,21	7,01
3.	120 Hz	2,92	7,72
4.	250 Hz	3,43	5,55
5.	500 Hz	2,60	5,13
6.	800 Hz	2,18	12,96
7.	1000 Hz - 1 kHz	1,83	4,23
8.	1500 Hz - 1,5 kHz	3,03	12,65
9.	2000 Hz - 2 kHz	3,73	10,03
10.	5000 Hz - 5 kHz	1,63	9,62
11.	10 000 Hz - 10 kHz	2,62	5,15

V preglednici 4 je prikaz posameznih frekvenc in njihovo izničevanje zvoka v dveh različnih fazah. Prva faza je izničevanje zvoka oziroma razlika v glasnosti, pri kateri sem na začetku imel v programu dva neodvisna kanala, ki sta imela enako vsebino. Pomembno je to, da sta oba kanala imela panoramsko sliko naravnano na sredino. Najprej sem izmeril glasnost obeh kanalov s panoramsko sliko »center«, nato pa sem prvi kanal panoramsko usmeril na levo stran, drugi kanal pa desno stran in zopet izmeril glasnost. To sem ponovil za vsako

frekvenco 13-krat oziroma pri 13-ih različnih glasnostih. V stolpcu PAN C/LR je povprečna vrednost razlike glasnosti.

V teoretičnem pogledu je znano, da se glasnost dvojnega izvora hrupa enake jakosti razlikuje od enojnega izvora hrupa za povprečno glasnost 3 dB. V tabeli 4 vidimo, da vrednosti nihajo. Povprečna vrednost razlik glasnosti znaša 2,88 dB, torej lahko povzamem, da sem dobil podoben rezultat kot pravi teorija. Razlike in odstopanja med podatki so posledica prostora, ki ni popolnoma ustrezal zvočni akustiki in merilnemu instrumentu, kateri je izračunaval povprečje zvočnega signala v časovnem intervalu 10 sekund.



Grafikon 1: Zmanjšanje zvoka z urejanjem PAN – L/R

V naslednji fazi preizkusa sem se lotil izničevanja zvoka z zamenjanimi fazami. Na razpolago sem imel dva kanala, ki sta imela različno panoramo levo in desno. Eno izmed njiju sem fazno zamenjal. To sem enostavno naredil s klikom na gumb v programski opremi, ki kanalu signal fazno zamenja. Potem sem meril za koliko se zvok na različnih glasnostih izniči. To sem naredil na vseh podanih frekvencah v preglednici 4, katere rezultati so prikazani v grafikonu 2.



Grafikon 2: Izničevanje zvoka pri posameznih frekvencah z zamenjavo faz

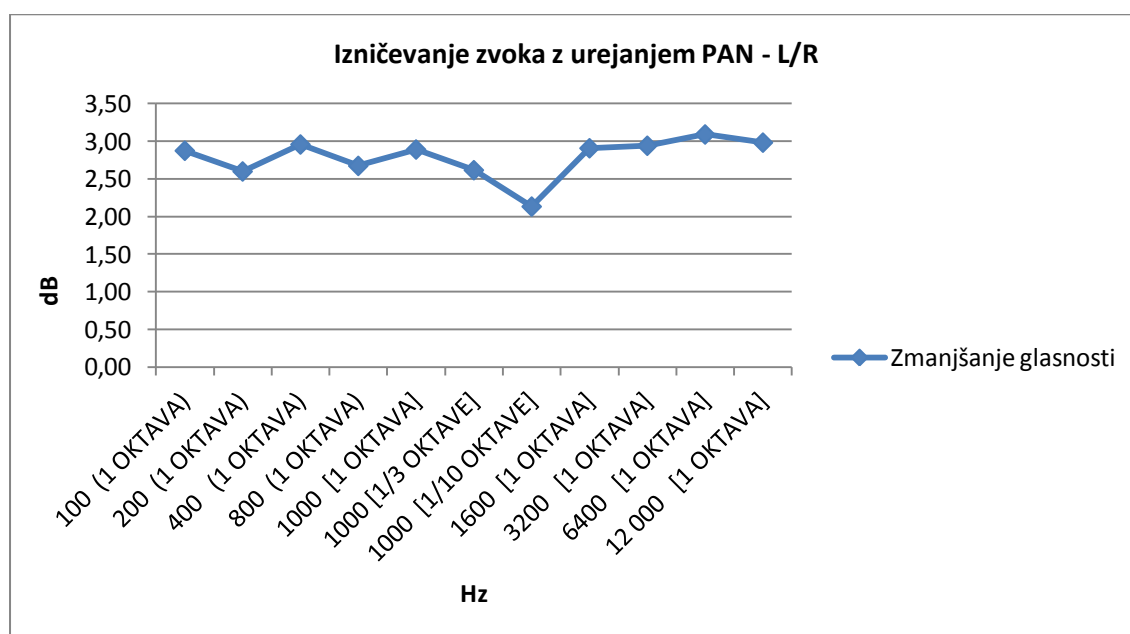
Pri izničevanju sem izračunal povprečje, ki znaša 7,67 dB. Kot vidimo na grafu, imamo zelo velik skok izničevanja zvoka pri 1000 Hz oziroma 1 kHz. Lahko predpostavim, da je prisoten vpliv prostora ali pa vpliv uporabljenih zvočnikov, kateri lahko predvajajo nekatere frekvence slabše kot ostale.

Naslednji preizkus sem naredil identično, le da sem za vzorce namesto frekvenc vzel spekter frekvenc, ki je bil v povprečju širok 1 oktavo. Tako sem lahko opazoval obnašanje in izničevanje zvoka ob širšem območju frekvenc, kar sem potreboval za primerjavo rezultatov v realnem sistemu oziroma v prometu in v studiu.

Preglednica 5: Zmanjšanje / Izničenje zvoka pri spektru frekvenc

ŠT. PREIZKUSA	VRSTA PREIZKUSA OPIS	ZMANJŠANJE / IZNIČENJE ZVOKA	
		PAN C / LR [dB]	LR/LR (zamenjani fazi) [dB]
1.	100 Hz (1 OKTAVA)	2,88	4,56
2.	200 Hz (1 OKTAVA)	2,60	4,14
3.	400 Hz (1 OKTAVA)	2,96	7,47
4.	800 Hz (1 OKTAVA)	2,67	7,69
5.	1000 Hz (700 Hz - 1400 Hz)	2,89	7,77
6.	1000 Hz (890 Hz - 1100 Hz)	2,62	6,74
7.	1000 Hz [1/10 OKTAVE]	2,13	7,20
8.	1600 Hz [1 OKTAVA]	2,91	8,18
9.	3200 Hz [1 OKTAVA]	2,94	6,09
10.	6400 Hz [1 OKTAVA]	3,09	0,53
11.	12 000 Hz [1 OKTAVA]	2,98	5,59

Pri obravnavanju spektra frekvenc ugotovimo, da se zmanjšanje glasnosti obnaša približno enako kot pri posameznih frekvencah, kar je bilo tudi pričakovano. Povprečna vrednost znaša 2,79 dB, kar prav tako potrди zgoraj navedeno domnevo.

**Grafikon 3: Izničevanje zvoka z urejanjem PAN – L/R**



Grafikon 4: Izničevanje zvoka pri spektru frekvenc z zamenjavo faz

Povprečna vrednost izničenja zvoka pri spektru frekvenc znaša 6,00 dB. Pojavi se skok v izničevanju zvoka, kar je prikazano v grafikonu 4, in sicer na frekvenčnem območju širine 1 oktave pri 6400 Hz. Če izvezemo to vrednost iz računa povprečja, dobimo vrednost 6,54 dB.

Zadnji sklop tega dela preizkusa pa sem namenil celotnemu spektru slišnega območja frekvenc od 20 Hz do 20 kHz. Ta preizkus ima dva različna dela. V prvem delu sem obravnaval frekvence od 20 Hz do 20 kHz, ki so zajete vse naenkrat. Pri tem pojavu dobimo tako imenovani »beli šum« ali »white noise«.

Preglednica 6: Zmanjšanje / Izničevanje zvoka pri spektru frekvenc 20 Hz – 20 kHz (beli šum)

ŠT. PREIZKUSA	VRSTA PREIZKUSA OPIS	ZMANJŠANJE / IZNIČENJE ZVOKA	
		PAN C / LR [dB]	LR/LR (zamenjani fazi) [dB]
1.	20 Hz - 20 kHz [šum]	3,03	6,62

Ti rezultati nam dajo celostni vpogled na prejšnje rezultate, katere tudi potrjujejo. Za naslednji del preizkusa pa sem uporabil tekoče frekvence od 20 Hz do 20 kHz. Izmeril sem povprečne vrednosti pri različnih glasnostih ki so trajale 10 sekund. Povprečna vrednost pa je podana v preglednici 7.

Preglednica 7: Zmanjšanje / Izničenje zvoka pri frekvencah 20 Hz – 20 kHz (tekoče frekvence)

ŠT. PREIZKUSA	VRSTA PREIZKUSA OPIS	ZMANJŠANJE / IZNIČENJE ZVOKA	
		PAN C / LR [dB]	LR/LR (zamenjani fazi) [dB]
1.	20 Hz - 20 kHz [tekoče frekvence]	2,96	6,76

5.4 Izničevanje zvoka ob cesti s protizvokom

Zanimalo me je tudi izničevanje zvoka z zvočnim posnetkom realnega avtomobila na cestišču. Tako sem posnel zvok avtomobila, ki se je gibal za različno hitrostjo. V začetnem delu o izničevanju zvoka sem pisal o uporabi kondenzatorskih in dinamičnih mikrofonov. Za test sem uporabil oba in tako primerjal rezultate.

Snemanje sem izvedel tako, da sem postavil tri mikrofone v ravno linijo, enako oddaljene od cestišča. Zvok sem snemal pri vseh treh mikrofoni naenkrat. Od tega sta bila dva dinamična mikrofona in eden kondenzatorski. Uporabil sem različna vozila in različne hitrosti vozil od 50 km/h do 100 km/h. Vzporedno sem postavil tudi napravo za merjenje glasnosti zvoka in meril povprečno ter maksimalno vrednost zvoka.



Slika 44: Postavitev mikrofonov ob cestišču

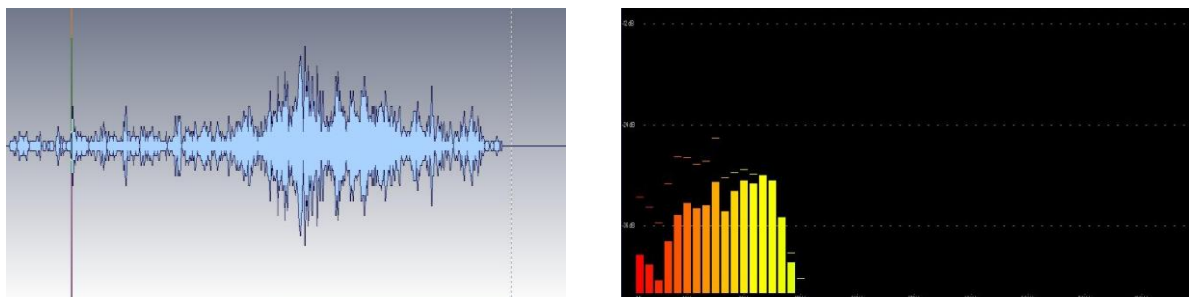


Slika 45: Postavitev mikrofona in snemalne opreme

Ob merjenju je pojavil veter, kar je popolnoma zadušilo kondenzatorski mikrofona, zato sem ga v sledečih analizah opustil. Posnetke se prvo vstavil v računalniški program »WaveLab«, s katerim sem analiziral zvok vozila. En obhod avtomobila sem razdelil na 4 dele, ki so prikazani na spodnjih slikah. V vsakem delu sem opazoval frekvence, katere se pojavijo na različnih delih obhoda avtomobila.

5.4.1 Test frekvenc zvoka pri 50 km/h

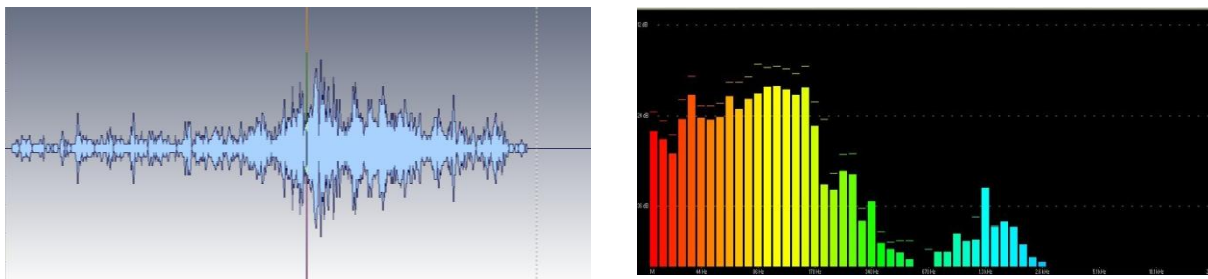
Za test frekvenc pri različnih hitrosti sem uporabil dinamični mikrofona Shure beta 58. Na prvi sliki vidimo, kako so se frekvence razvijale pri prvem oziroma začetnem delu obhoda vozila.



Slika 46: 1. korak pri hitrosti 50 km/h

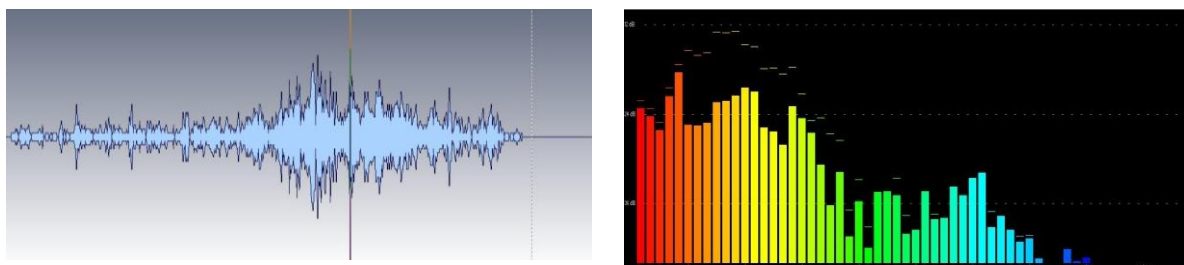
Na sliki vidimo, da se frekvenčno območje v prvem koraku razvije do približno 170 Hz, kar lahko komentiramo, da so to nizke frekvence in je te težje nadzorovati.

Drugi korak je prikaz zvoka tik pred vrhuncem oziroma pri točki naraščanja glasnosti zvoka.

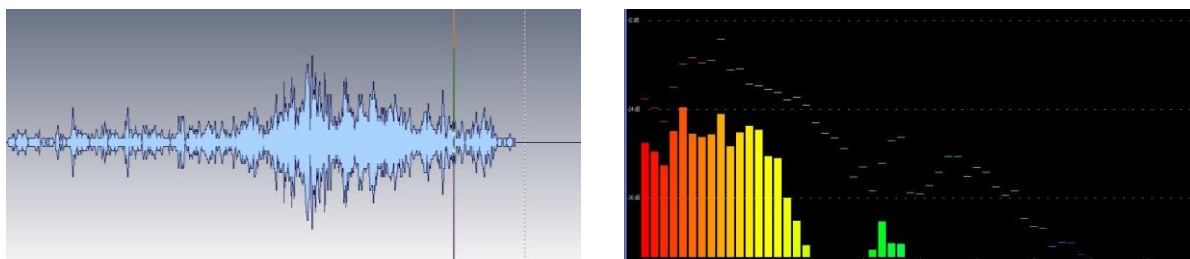


Slika 47: 2. korak pri hitrosti 50 km/h

V drugem koraku se frekvence razvijejo do 350 Hz in prvotne se ojačajo, začnejo pa se razvijati tudi frekvence okrog 1300 Hz.

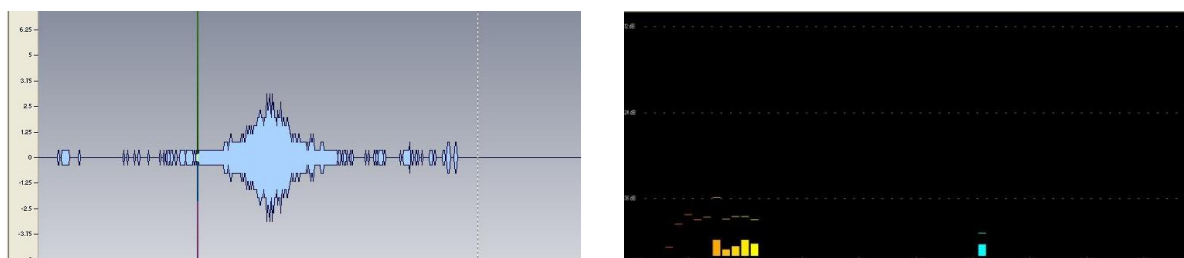


Slika 48: 3. korak pri hitrosti 50 km/h

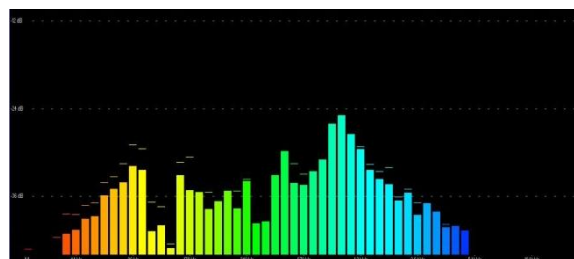
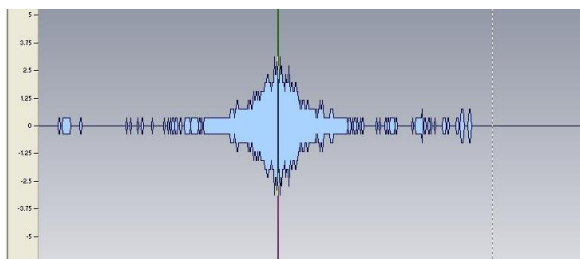


Slika 49: 4. korak pri hitrosti 50 km/h

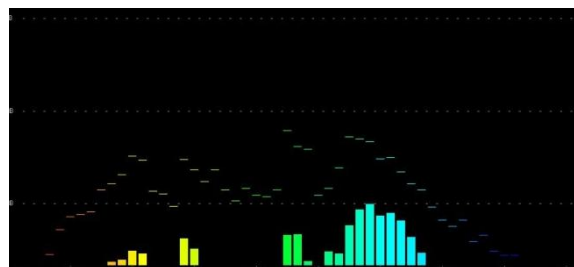
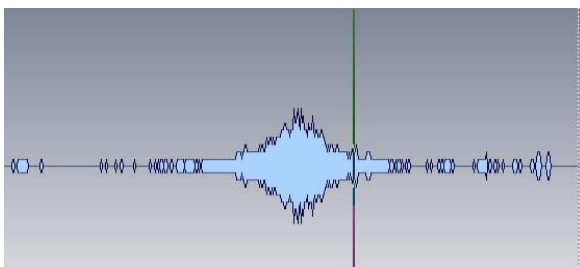
5.4.2 Test frekvenc zvoka pri 70 km/h



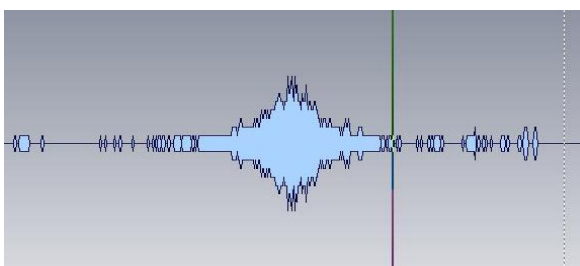
Slika 50: 1. korak pri hitrosti 70 km/h



Slika 51: 2. korak pri hitrosti 70 km/h

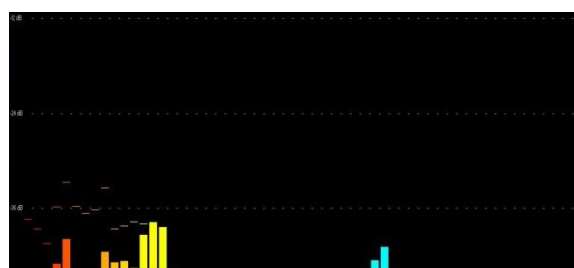
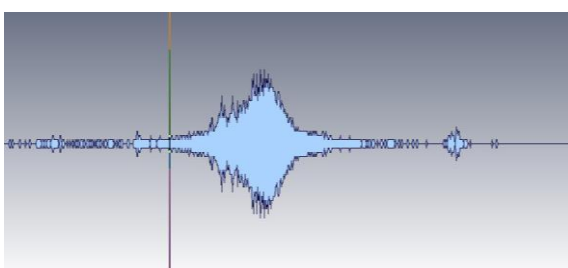


Slika 52: 3. korak pri hitrosti 70 km/h

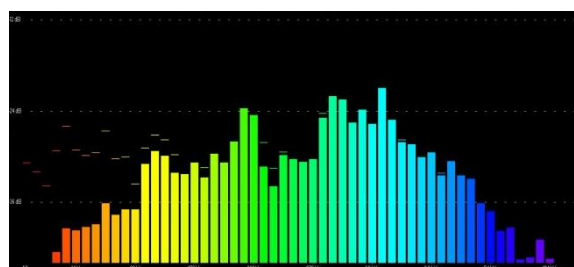
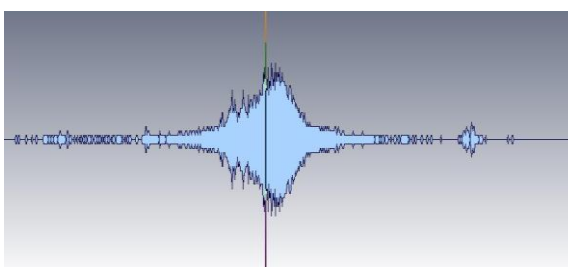


Slika 53: 4. korak pri hitrosti 70 km/h

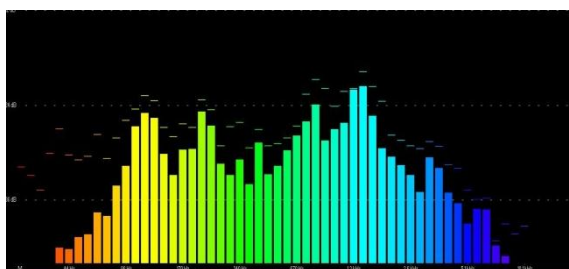
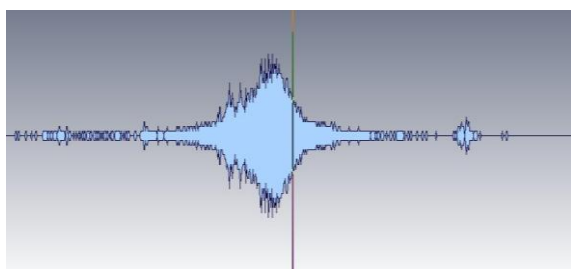
5.4.3 Test frekvenc zvoka pri 100 km/h



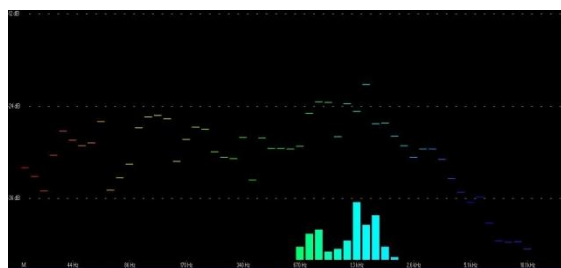
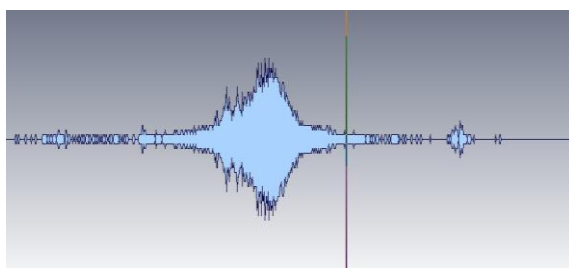
Slika 54: 1. korak pri hitrosti 100 km/h



Slika 55: 2. korak pri hitrosti 100 km/h



Slika 56: 3. korak pri hitrosti 100 km/h



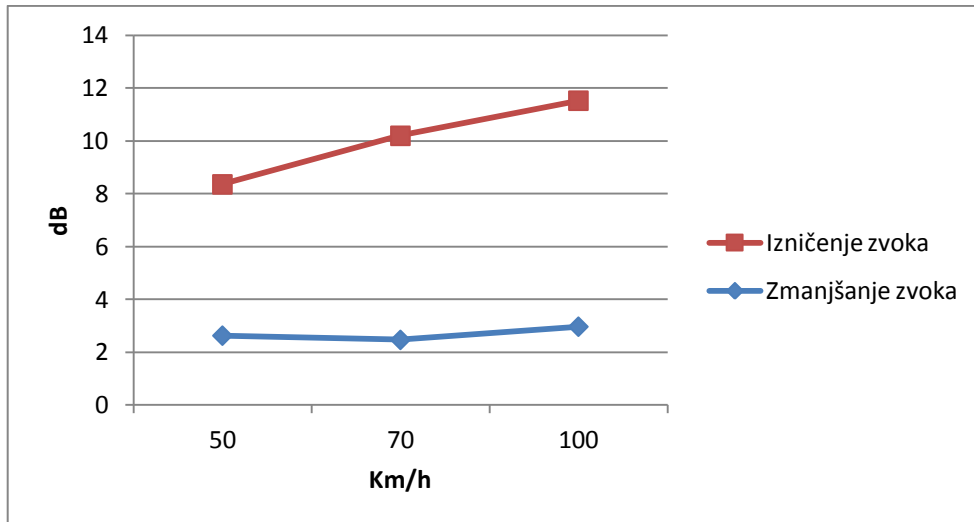
Slika 57: 4. korak pri hitrosti 100 km/h

5.5 Izničevanje zvoka avtomobila posnetega na terenu

Na terenu sem posnel dejansko stanje zvoka za mimoidoči avtomobil. Ugotovil sem, da se frekvence pojavljajo v odvisnosti od same pozicije avtomobila. Ko je avtomobil še nekoliko oddaljen, so prisotne v veliki večini nizke frekvence. Ko pa se avtomobil približuje, in ko je v točki pravokotno na merilec zvoka, se pojavi spekter frekvenc od 40 Hz do 10 kHz. V naslednjem preizkusu bom preizkusil na enak način izničiti zvok, kot sem v prejšnjem delu počel s posameznimi frekvencami oziroma frekvenčnimi spektri.

Preglednica 8: Zmanjšanje / Izničenje zvoka s posnetkom mikrofona beta 58

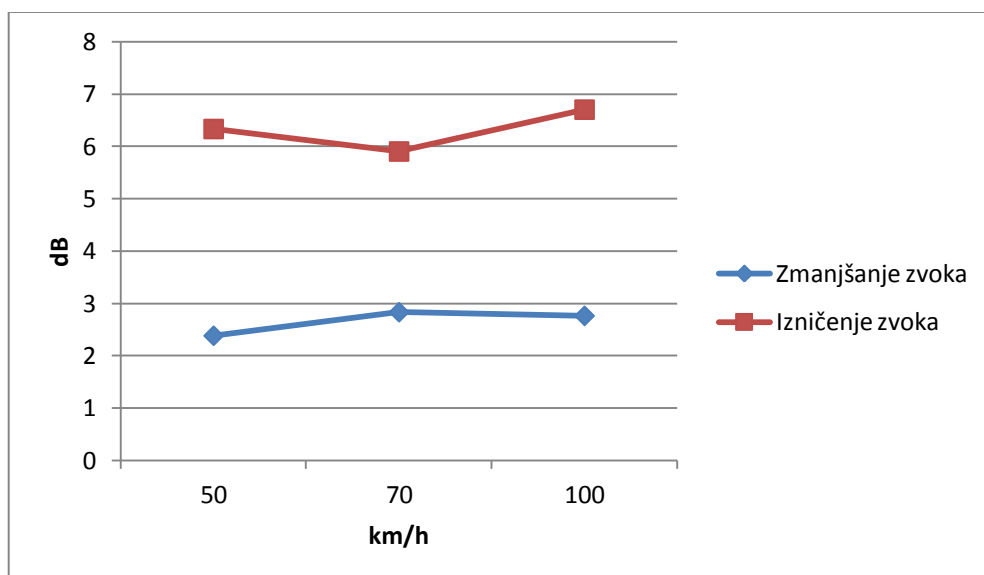
ŠT. PREIZKUSA	VRSTA PREIZKUSA OPIS [km/h]	ZMANJŠANJE / IZNIČENJE ZVOKA	
		PAN C / LR [dB]	LR/LR (zamenjani fazi) [dB]
1.	50	2,63	5,73
2.	70	2,47	7,73
3.	100	2,97	8,56



Grafikon 5: Zmanjšanje / Izničenje zvoka s posnetkom mikrofona beta 58

Preglednica 9: Zmanjšanje / Izničenje zvoka s posnetkom mikrofona SM 58

ŠT. PREIZKUSA	VRSTA PREIZKUSA OPIS	ZMANJŠANJE / IZNIČENJE ZVOKA	
		PAN C / LR [dB]	LR/LR (zamenjani fazi) [dB]
1.	50 km/h (SM 58)	2,38	6,33
2.	70 km/h (SM 58)	2,83	5,90
3.	100 km/h (SM 58)	2,76	6,70



Grafikon 6: Zmanjšanje / Izničenje zvoka s posnetkom mikrofona SM 58

Rezultati izničevanja in zmanjševanja zvoka avtomobila posnetega na terenu so vidni v grafikonih 5 in 6.

5.6 Primerjava rezultatov

Rezultati, katere sem dobil pri izničevanju zvoka v studiu so zame zadovoljivi, če gledam iz stališča, da je bil že kakršnokoli izničenje zvoka zame uspeh. Povprečno sem zvok izničeval za približno 6 do 12 dB. Če dobljene rezultate primerjam z preizkusom, ki je bil opravljen na Nizozemskem lahko rečem, da je stopnja izničevanja zvoka podobna pa čeprav je bil njihov preizkus verjetno zasnovan na višji ravni natančnosti in opremljenosti. Z panoramsko sliko sem povprečno dobival večanje oziroma manjšanje jakosti zvoka za okrog 3dB, ki se prav tako ujema z teoretičnim načelom. Pri analizi zvočnega posnetka mimoidočega avtomobila lahko povzamem, da eno samo osebno vozilo ustvari spekter frekvenc ki zajemajo celotni spekter frekvenčnega območja. Dobra lastnost je ta, da se imenovani spekter ustvarja postopoma in ga je lažje obvladovati, kajti osebno vozilo poleg zvoka ustvari tudi določen veter kateri se vije za avtomobilom. Problem nastane, ko imamo več vozil hkrati oziroma, ko gredo vozila ena za drugo. Pri tem se spekter ne ustvarja postopoma ampak nastane en glasen šum, katerega je težje obravnavati, poleg tega pa se ustvari tudi večja količina vetra. Mogoče je zato lažje delati z izvorom hrupa, kateri se ne premika. Tu je mišljeno kot hrup gradbišča ali hrup industrije.

6 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi sem se lotil raziskovanja aktivnih protihrupnih ograj, ki zaenkrat še nimajo svetle prihodnosti v gradbeništvu in v prometu. Razlogov je več, eden poglobitnih pa je dejstvo, da so rezultati izničenja zvoka v primerjavi z zmanjševanjem zvoka z današnjimi protihrupnih ograjah manjši. V samem prometu je avtomobilska industrija namenila veliko denarja za proizvodnjo tišjih vozil in v povprečju stišala vozila za 10 dB, vzporedno pa se je v tem času količina prometa močno povečala, tako, da se hrup ni zmanjšal temveč povečal.

V praktičnem delu diplomske naloge sem preizkušal dobiti čim boljše sliko kaj se dogaja z frekvencami, ko se po cesti pelje osebni avtomobil. Opazil sem da se pri obhodu vozila mimo ene točke sprostijo vse frekvence na območju od 20 Hz do 20 kHz iz česar lahko zaključim, da je potrebno nameniti prav toliko pozornosti nizkim kot visokim frekvencam. Pri idejni zasnovi kombinirane protihrupne ograje sem upošteval svoje ugotovitve in poskusil zasnovati kombinirano protihrupno ograjo, ki bi bila učinkovita pri zmanjševanju prometnega hrupa na področju celotnega frekvenčnega spektra. Tako sem za nižji del predpostavil AB element na katerega bi namestil absorpcijske plošče za prevzem zvoka v območju nizkih frekvenc. Na nosilni element pa bi namestil jekleno konstrukcijo katera bi nosila osnovne elemente aktivnega protihrupnega sistema. Le-ta bi izničeval zvok s protizvokom in to zgolj na frekvenčnem območju, ki bi bilo pozicionirano višje. Dejansko ne morem trditi, kako bi zasnovana protihrupna ograja izničevala in zmanjševala hrup, lahko pa na podlagi rezultatov iz studia menim, da bi delovala vsaj približno tako kakor sem si zastavil njeno delovanje.

V prihodnosti bodo aktivne protihrupne ograje po vsej verjetnosti v uporabi, ne vemo pa do kakšne mere oziroma v kakšni kombinaciji. Kot vemo, se na zelo podoben način delovanja že izdelujejo in na trgu prodajajo slušalke, katere zmanjšujejo hrup z protizvokom. Za raziskovanje delovanja same aktivne protihrupne ograje pa je potrebno veliko znanja ter drage opreme, bodisi audio ali računalniške opreme. Zato bi bilo dobrodošlo, da pri raziskovanju aktivnega izničenja zvoka oziroma hrupa prometa sodelujejo strokovnjaki različnih področij. Pri tem mislim na gradbene, elektro ter audio inženirje, kateri bi s skupnim znanjem dosegli sigurno dober rezultat.

Pomembno je, da se znanost usmerja v raziskave aktivnega izničenja zvoka, ker menim, da je ima ta oblika zmanjševanja hrupa prihodnost, le da v tem trenutku še ni dodelana za samo izničevanje hrupa v prometu in gradbeništvu.

VIRI

- [1] Wikipedija. 2012
<http://sl.wikipedia.org/wiki/Zvok> (Pridobljeno 20.7.2012)
- [2] Ravnikar, B. 1999. Osnove glasbene akustike in informatike. Ljubljana, DZS: 231 str.
- [3] Ministrstvo za okolje in prostor. 2012
http://www.mop.gov.si/si/delovna_podrocja/hrup/ (Pridobljeno 20.7.2012)
- [4] Hansen, C. H. 2001. Understanding active noise cancellation. London. Spon Press.
162 str.
- [5] Wikipedija. 2012
http://sl.wikipedia.org/wiki/Kondenzatorski_mikrofon (Pridobljeno 23.8.2012)
- [6] Bies, D.A. and Hansen C.H. 2003. Engineering noise control. London. Spon Press.
719 str.
- [7] Rossing, D. T. 2007. Springer handbook of acoustic. New York. LLC. 741 str.
- [8] Bruel & Kjaer. 2012
<http://www.bksv.com/> (Pridobljeno 12.4.2012)
- [9] M.Krutzen, A. Mast, F.G.de Beer. 2002. Active Noise Barrier; phase1: Simulation study. 36 str.
- [10] N. Petkovič, 2009. Akustika kontrolne sobe v zvočnem studiu kot pomemben element komuniciranja s poslušalcem. Maribor, N.Petkovič. 89 str.

SEZNAM PRILOG

PRILOGA A1: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 80 Hz

PRILOGA A2: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 100 Hz

PRILOGA A3: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 1200 Hz

PRILOGA A4: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 250 Hz

PRILOGA A5: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 500 Hz

PRILOGA A6: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 800 Hz

PRILOGA A7: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 1000 Hz

PRILOGA A8: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 1500 Hz

PRILOGA A9: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 2000 Hz

PRILOGA A10: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 5000 Hz

PRILOGA A11: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 10000 Hz

PRILOGA B1: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 100 Hz (1 oktava)

PRILOGA B2: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 200 Hz (1 oktava)

PRILOGA B3: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 400 Hz (1 oktava)

PRILOGA B4: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 800 Hz (1 oktava)

PRILOGA B5: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 1000 Hz (1 oktava)

PRILOGA B6: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 1000 Hz (1/3 oktave)

PRILOGA B7: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 1000 Hz (1/10 oktave)

PRILOGA B8: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 1600 Hz (1 oktava)

PRILOGA B9: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 3200 Hz (1 oktava)

PRILOGA B10: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 6400 Hz (1 oktava)

PRILOGA B11: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 12000 Hz (1 oktava)

PRILOGA C1: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 20 Hz - 20 kHz (šum)

PRILOGA C2: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka 20 Hz - 20 kHz (tekoče frekvence)

PRILOGA D1: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka prometa z mikrofonom SHURE beta 58 (50 km/h)

PRILOGA D2: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka prometa z mikrofonom SHURE beta 58 (70 km/h)

PRILOGA D3: Rezultati preizkusa v studiu - izničenje zvoka prometa z mikrofonom SHURE beta 58 (100 km/h)

PRILOGA D4: Rezultati preizkusa v studiu - izničevanje zvoka prometa z mikrofonom SHURE SM 58 (50 km/h)

PRILOGA D5: Rezultati preizkusa v studiu - izničevanje zvoka prometa z mikrofonom SHURE SM 58 (70 km/h)

PRILOGA D6: Rezultati preizkusa v studiu - izničevanje zvoka prometa z mikrofonom SHURE SM 58 (100 km/h)

PRILOGA D7: Rezultati preizkusa na terenu -merjenje glasnosti prometa (avtomobilov)