

Riku Rantala

Testilaitteen suunnittelemisen ja rakentamisen äänekkäiden pumppujen todentamiseen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

10.1.2016

Tekijä(t) Otsikko	Riku Rantala Testilaitteen suunnittelemisen ja rakentaminen äänekkäiden pumppujen todentamiseen
Sivumäärä Aika	37 sivua + 2 liitettä 10.1.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Elektroniikka ja terveydenhuollon tekniikka
Ohjaaja(t)	Engineering Manager Hannu K. Seppänen Yliopettaja Matti Fischer
<p>Tämän insinööryön aiheena oli suunnitella ja rakentaa GE Healthcare Finland Oy:n käyttöön pumppujen äänekkyyden testaukseen soveltuva laite. Pumput asennetaan kaasumuodulleihin, joita käytetään sairaalaympäristöissä potilasvalvontamonitoreissa. Äänekkäät pumput aiheuttavat epämieluisaa melua, jonka takia äänekkäitä pumppuja ei haluta päästää asiakkaille.</p> <p>Aikaisemmassa tilanteessa pumppujen äänen testaus suoritettiin pelkästään testaajien omaan kuuloon perustuen eli kuuntelemalla pumppujen ääntä. Tällöin jokaiselle testaajalle muodostui omanlainen käsityksensä äänekkästä pumpusta eikä olemassa ollut mitään tiettyä absoluuttista rajaa. Tämän lisäksi testaustilan taustamelu vaihtelee erittäin paljon hiljaisesta meluisaan, jolloin se vaikuttaa todella paljon lopputuloksiin. Tilannetta vaikeuttaa lisäksi myös se, että pumpun ääni muuttuu voimakkaammaksi moduulin sisällä, koska se pääsee resonoimaan laitteen runkoa pitkin.</p> <p>Työn alussa tarkastellaan äänen havainnoimista sekä vaimennuksen perusteita. Tämän jälkeen rakennettiin vaimennuslaatikko, jossa testattiin ja kuunneltiin pumppuja. Projektissa tehtiin useita mittauksia niin pumpun äänekkyydestä kuin vaimennuksesta. Saadun datan avulla kehiteltiin tapa, jolla pystytään päättelemään pumpun äänekkyyttä.</p>	
Avainsanat	desibeli, pumppu, vaimennus, vaimennuslaatikko

Author(s) Title	Riku Rantala Designing and Building a Test Device for Detecting Noisy Pumps
Number of Pages Date	37 pages + 2 appendices 10 January 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electronics and Medical Engineering
Instructor(s)	Hannu K. Seppänen, Engineering Manager Matti Fischer, Principal Lecturer
<p>The purpose of this thesis was to plan and build a device that can detect noisy pumps. The thesis was made for GE Healthcare Finland Oy. The pumps are installed inside gas modules which are used in hospital environment along patient monitors. Noisy pumps create undesirable noise which is why noisy pumps are not wanted near customers.</p> <p>In the original situation the testing of the pumps was made by listening the noise of the pumps by workers themselves. Every worker formed an individual opinion of a noisy pump and a quiet one. Therefore there was not any absolute limit for noisy pumps. Also the background noise of the testing room varies a lot from quiet to noisy and therefore affects considerably the testing results. When the pump is inside the module, it resonates through the frame and sounds noisier, making the situation more complicated.</p> <p>The first part of this thesis work was to examine sounds observing and the principles of attenuation. After that an anechoic test box where the pumps can be tested and listened was built. During the project several measurements were made concerning the pump noise and attenuation. With the help of results of the measurements, a system for how noisy pumps can be separated between quiet pumps was developed.</p>	
Keywords	anechoic box, attenuation, decibel, pump

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Ääni ja äänen synty	2
2.1	Taajuus	3
2.2	Äänenvoimakkuus	3
2.3	Taajuuspainotus	4
2.4	Äänekkyytaso	5
3	Äänenvaimennus	6
3.1	Vaimennusmateriaaleja	7
3.2	Absorptio	8
3.3	Matalat taajuudet	9
4	Resonaattorit	9
4.1	Levyresonaattori	10
4.2	Helmholtz-resonaattori	11
4.3	Reikäresonaattori	12
5	Vaimennuslaatikon rakentaminen	13
5.1	Mikrofoni	14
5.2	Vaimennusmateriaali	14
5.3	Testattavan laitteen kiinnitys	16
6	Testaaminen ja analysointi	17
6.1	Vaimennusmateriaalin testaaminen	17
6.2	Pumppujen testaaminen	23
7	Testilaitteen toimintaperiaate ja testaaminen	29
7.1	Testilaitteen toimintaperiaate	29
7.2	Testilaitteen testaaminen ja tulosten analysointi	33
8	Yhteenveto	34
	Lähteet	36

Liite 1 Äänekkyydestin 1 tulokset

Liite 2 Äänekkyydestin 2 kokonaistulokset

Lyhenteet

dB	Desibeli
dBFS	dB (full scale); desibelin maksimitaso
dB SPL	Sound Pressure Level; äänenpainetaso
FFT	Fast Fourier Transform; nopea Fourier'n muunnos
GE	General Electric
Pa	Pascal; paineen yksikkö

1 Johdanto

Tämä insinööri työ on tehty GE Healthcare Finland Oy:lle, joka on osa amerikkalaista General Electric -suuryritystä. GE Healthcare Finland valmistaa lukuisia eri lääkintälaitteita, klinisiä tietojärjestelmiä ja lääketieteessä käytettäviä apuvälineitä. Helsingin Vallilassa GE valmistaa mm. potilasvalvontamonitoreja sekä niissä käytettäviä kaasumoduuleja ja HEMO-tuoteperheen moduuleja. Vallilassa työntekijöitä on noin 700 ja koko Suomessa noin 750.

[1.] Mini-C on kaasumoduuli, jolla mitataan mm. CO₂-pitoisuuksia sekä potilaan hengityksen tahtia. Moduuli kiinnitetään potilasvalvontamonitoriin. Kaasumoduulin sisällä käytetään pienikokoista pumppua, joka aiheuttaa käynnissä ollessaan pientä melua. Jos melu on liian äänekkästä, aiheuttaa se epämiellyttävää melua sairaalaolosuhteissa asiakkaalle.

Insinööri työnsä tavoitteena oli kehittää mittauslaite, jolla pystyttäisiin selvittämään, mitkä pumppuista ovat liian äänekkäitä ja täten kelvottomia laitettaviksi moduuleihin ja lähetettäväksi asiakkaille. Tällä hetkellä linjastolla, jossa moduuli kootaan, työntekijä kuuntelee omilla korvillaan pumpun äänekkyyden ja päättää itse, onko pumppu äänekkäs vai ei. Tämä tapa ei ole kovin ideaali, sillä jokaisella työntekijällä on omanlainen käsityksensä äänekkästä pumpusta ja lisäksi taustamelun määrä vaihtelee todella paljon, jolloin pumpun ääni voi osittain peittyä taustameluun. Pumppujen kuuntelusta on myös tehty testi, joissa henkilöt kuuntelevat samat pumput kahteen kertaan ja merkkäavat, onko pumppu äänekkäs vai ei. Tuloksista huomattiin, että testaajat saivat toisella testikerralla poikkeavia tuloksia ensimmäiseen testikertaan verrattuna.

Lisäksi äänekkäitä pumppuja on erilaisia. Pumppujen taajuudet vaihtelevat, jotkin värähtelevät mekaanisesti, jotkin särisevät ja jotkin käyvät epätasaisesti ja siten aiheuttavat erilaista melua. Tällöin työntekijän on vaikea arvioida, missä menee hiljaisen ja äänekkään pumpun ero. Suurin ongelma koskee pumppuja, jotka ovat äänen suhteen rajoilla: onko pumppu hieman liian äänekkäs, vaiko juuri rajan alapuolella ja tällöin vielä hyväksyttävä. Mittauslaite on lähtökohtaisesti tarkoitettu mini-C-laitteissa käytettävien pumppujen testaukseen sekä tarvittaessa kokonaisen moduulin testaukseen. Mittauslaite ja vaimennuslaatikko, jonka sisällä testi suoritetaan, suunnitellaan kuitenkin sillä tavalla,

että sitä voidaan käyttää myös muiden vastaavanlaisten pumppujen ja moduulien testaukseen.

Projektin alussa keskityttiin vaimennuksen periaatteisiin ja erilaisiin vaimennusmateriaaleihin. Jotta pumppuja ja moduuleita pystyttäisiin testaamaan äänekkyuden suhteen muuttumattomissa olosuhteissa, rakennettiin tätä varten oma kaiuton vaimennuslaatikko, koska vastaavanlaiset kaupalliset kaiuttomat laatikot ovat sen verran hinnakkaita. Tällä tavalla saatiin poistettua tehtaan aiheuttama taustamelu tuloksista. Tämän jälkeen päästiin testaamaan pumppuja vaimennuslaatikossa ja keräämään dataa. Dataa analysoimalla pyrittiin kehittämään keino, jolla pystyttäisiin erittelemään äänekkyä ja hiljaiset pumput toisistaan, ja tämän avulla rakentamaan jonkinlainen mittauslaite.

2 Ääni ja äänen synty

Ääni syntyy, kun jokin esine tai asia värähtelee tai tärisee ja täten luo ilmassa oleviin pieniin molekyyleihin tihentymiä ja erilaisia harventumia, jotka synnyttävät ketjureaktion, jolloin ääni pääsee etenemään. Värähtelyn seurauksena ilmanpaine muuttuu ja tästä syntyvä paineaalto matkaa korviimme ilman kautta. [2.]

Ääni liikkuu eri nopeuksilla eri väliaineissa. Äänen nopeus ilmassa lasketaan kaavalla 1

$$331.4 + 0.6T \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad (1)$$

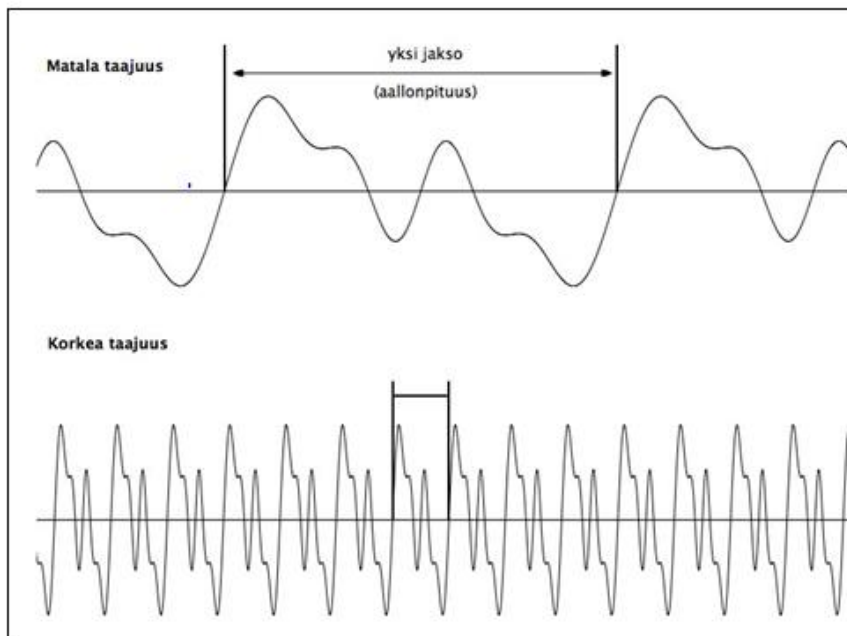
jossa T on ilman lämpötila celsiusasteina. Muiden aineiden nopeuksia on lueteltu taulukossa 1.

Taulukko 1. Äänen nopeus eri väliaineissa [3].

väliaine	nopeus	väliaine	nopeus
ilma 0 °C (273 K)	331 m/s	vesi	1500 m/s
ilma 20 °C (293 K)	344 m/s	jää	3200 m/s
teräs	6100 m/s	kupari	5000 m/s
helium	970 m/s	vety	1270 m/s
lasi	5600 m/s	mineraalivilla	180 m/s

2.1 Taajuus

Äänen taajuudesta puhuttaessa yksikkönä käytetään hertsiä (Hz), joka kertoo, kuinka monta kertaa ääniaallot värähtelevät sekunnissa. Esimerkiksi 16 hertsissä ääniaallot ehtivät värähtelemään 16 kertaa yhden sekunnin aikana. Mitä suurempi taajuus, eli mitä useammin ääniaallot värähtelevät sekunnin aikana, sitä korkeampi ääni syntyy. Ääniaallon aallonpituus on matka, jonka aalto kulkee yhden jakson aikana. Aallonpituus on nopeus jaettuna taajuudella. Kuvassa 1 näkyy, kuinka aallonpituus pienenee samalla, kun taajuus kasvaa. Ihminen kuulee normaalisti ääniä, jotka ovat taajuusvälillä 20 - 20 000 Hz. [2.]



Kuva 1. Taajuuden vaikutus aallonpituuteen [2].

2.2 Äänenvoimakkuus

Äänenvoimakkuuden yksikkönä käytetään desibeliä (dB), joka vertailee tehosuureiden suhteita. Alin arvo on 0 dB, ja melurajana pidetään 80 - 85:tä desibeliä. 0 desibeliä ei tarkoita täydellistä hiljaisuutta vaan alinta äänentaso, jonka ihminen pystyy kuulemaan. Tällöin käytetään yksikköä dB SPL (Sound Pressure Level) eli äänenpainetaso. Tässä insinööriyössä desibeleistä puhuttaessa tarkoitetaan tätä yksikköä, ellei toisin ole mää-

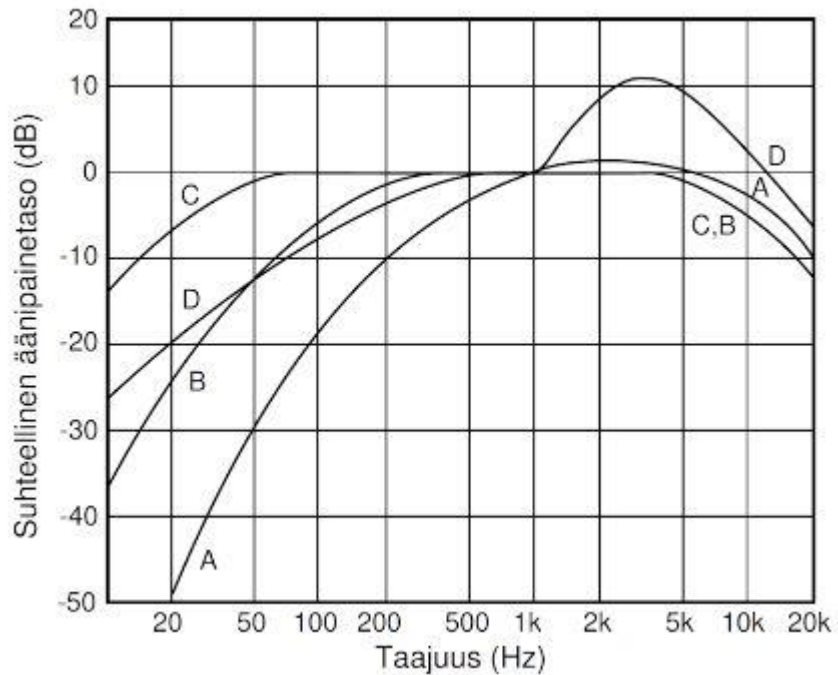
ritelty. Desibeliasteikko on logaritminen, eli esim. äänen voimakkuuden kaksinkertaistuminen tarkoittaa desibeliasteikolla +6 desibelin lisäystä. Ihmisen korva kuitenkin tuntee voimakkuuden kaksinkertaistumisen vasta, kun äänenvoimakkuus on noussut 10 dB. [4.]

Koska desibeli on logaritminen arvo, sitä ei voi käyttää samalla tavalla kuin lineaarisia arvoja yhteen- ja vähennyslaskuissa. Laskutoimituksissa desibeliarvot pitää ensimmäiseksi muuntaa pascalleiksi (Pa) ja laskea laskutoimitukset, minkä jälkeen lopputulokset muunnetaan jälleen takaisin logaritmisiksi. 0 desibeliä vastaa arvoltaan 20 μ pascalia ja 130 desibeliä 200 pascalia. Koska painealue on näin suuri, käytetään mieluummin desibeliasteikkoa, koska se on selvempää. Ihmisen aistit kuten myös kuuleminen ovat useimmiten logaritmisia. Esimerkiksi äänenpaineen kymmenkertaistuminen tuntuu aina, joka kerta yhtä suurelta. Toisin sanoen äänenpaineen kasvu yhdestä pascalista kymmenen kuulostaa aina samansuuruiselta muutokselta, kuin kymmenestä pascalista saadaan. Tästä syystä logaritminen desibeliasteikko luonnistuu paremmin ihmisen korvalle. [5.]

2.3 Taajuuspainotus

Ihminen ei pysty kuulemaan kahta ääntä voimakkuudeltaan samantasoisina, vaikka äänenpainetaso olisi tismalleen sama, jos äänen taajuus on erilainen. Ihmisen kuuloaisti on herkimmillään 3000 Hz:n kohdalla ja sitä ympäröivillä taajuuksilla, kun taas matalilla ja korkeilla taajuuksilla kuuloaisti toimii erittäin epäherkästi. Kuuloalueen ala- ja yläpäässä kuulokynnys on useita desibelejä korkeammalla kuin kaikkein herkimmillä alueilla. Tätä varten on kehitetty erilaisia taajuuspainotusluokkia. Useimmiten käytetty on A-taajuuspainotus, jossa matalia ja korkeita taajuuksia vaimennetaan vastaamaan ihmisen kuulokynnystä. Muita taajuuspainotusluokkia ovat B-, C- ja D-painotus sekä lineaarinen taajuuspainotus, joka ei painota mitään taajuutta, vaan näyttää todenmukaisen äänenpainetason. [6, s.17–18; 7.]

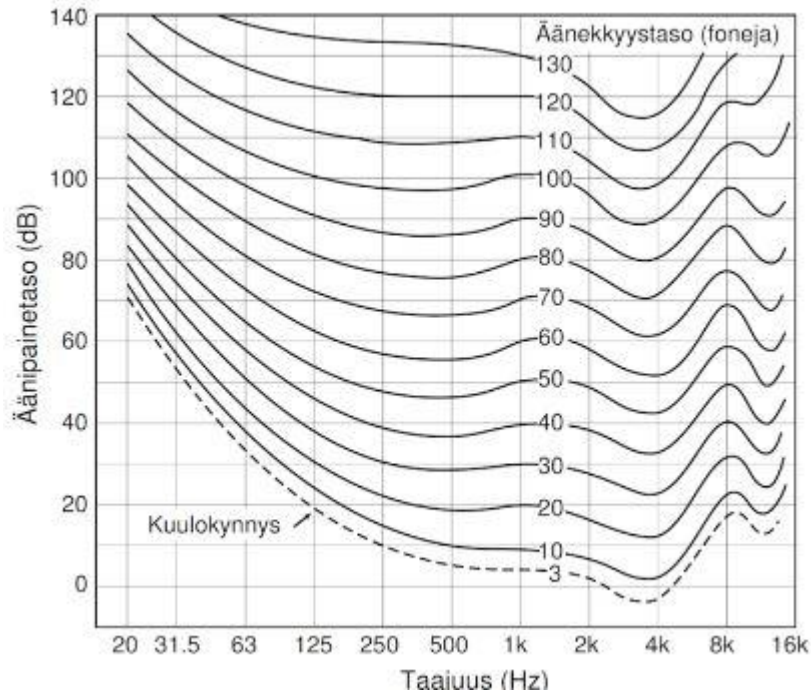
Kuvassa 2 on kuvattu eri taajuuspainotusluokat käyrinä. Vanhempia B- ja D-painotusta käytetään nykyään harvemmin, sillä nykyinen uudempiäikainen A-painotus on korvannut ne laajalti. C-painotusluokkaa käytetään lähinnä mitattaessa impulssimaisia ääniä eli ääniä, joissa on hetkellinen äänihuippu, joka kestää maksimissaan 1 sekunnin ajan. Painotus voidaan merkitä esimerkiksi A-painotusluokassa joko L_A tai dB (A). [8.]



Kuva 2. Käytössä olevat taajuuspainotukset [9].

2.4 Äänekkyytaso

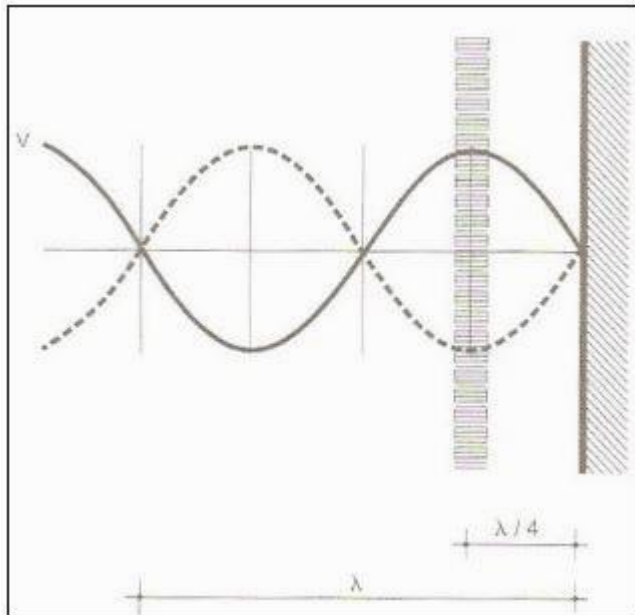
Koska ihminen ei siis kuule ääniä yhtä voimakkaana eri taajuuksilla, käyttöön on otettu äänenpainetason lisäksi myös äänekkyytaso helpottamaan eri äänenvoimakkuuksien havainnollistamista. Äänekkyytasolla kuvataan sitä, kuinka suuri äänenpainetaso eli desibelilukema vaaditaan aiheuttamaan yhtä voimakas kuuloaistimus eri taajuuksilla. Yksikkönä käytetään fonia. Äänekkyytaso (foni) on lukuarvoltaan yhtä suuri kuin 1 kHz:n taajuudella oleva äänenpainetaso desibeleinä. Eli 70 fonia 1 kHz:n taajuudella on samalla myös 70 desibeliä. Kuvasta 3 nähdään esimerkiksi, että 50 fonin äänekkyytaso 63 Hz:n taajuudella vaatii noin 65 desibelin äänenpainetason, kun taas 2 kHz:n taajuudella se on vain vajaat 50 desibeliä. Eli, vaikka äänenpainetasot ovat erisuuruisia, ihminen kuulee silti äänen yhtä voimakkaana molemmissa tapauksissa. Ihmisen kuulokynnystä vastaava äänekkyytaso on noin 3 fonia ja kipurajaa (130 dB) vastaava 130 fonia. [7.]



Kuva 3. Vakioäänekkyyskäyrästä [7].

3 Äänenvaimennus

Äänen liikuessa vaimennusaineen, esimerkiksi villan tai ilman läpi aineessa olevat hiukaset liikkuvat heilahdellen. Jokaisesta heilahduksesta syntyy kitkaa, jolloin liikkeen nopeus hiljalleen hidastuu ja liike-energia muuttuu lämmöksi. Äänen vaimeneminen yksistään ilmassa on erittäin vähäistä, mutta sekoittamalla ilmaan kuituja esimerkiksi mineraalivilloja tai vaahtomuovia, vaimennus tehostuu, kun ilmassa olevat molekyylit törmäilevät niitä vasten. Äänen törmätessä kovaan ja kiinteään rakenteeseen ilmamolekyylien nopeus ilmassa hidastuu lähes nolnaan. Suurimman nopeuden ilmamolekyylit saavat, kun aallonpituus on neljännesosan etäisyydellä esteestä. Äänenvaimennusta suunniteltaessa onkin erittäin tärkeää ottaa huomioon, että vaimennusmateriaalin paksuus olisi 1/4-osaa aallonpituudesta, tai ainakin 1/8, jotta materiaali vaimentaisi kunnolla ääntä halutuilla taajuuksilla. Kuten kuvasta 4 nähdään, väliin voidaan jättää myös ilmaväli, jolloin itse vaimennusmateriaali voidaan sijoittaa kohtaan, jossa nopeus on suurimmillaan. [6, s.14 - 15.]



Kuva 4. Vaimennusmateriaalin paras sijoituskohta [10].

3.1 Vaimennusmateriaaleja

Yleisimmin käytettyjä vaimennusmateriaaleja ovat mm. erilaiset huokoiset mineraalivillat (kivivilla ja lasivilla) ja vaahtomuovit sekä tiivisrakenteiset bitumi -ja polymeerimassa. Keskisuurten- ja suurten taajuuksien vaimentamisessa käytetään lähinnä huokoisia vaimennusmateriaaleja, ja matalammilla taajuuksilla taas raskaita ja tiiviitä materiaaleja. [11.]

Mineraalivillat valmistetaan sulattamalla raaka-aine ja sen jälkeen puristamalla aine pienten reikien läpi muottiin. Tämän jälkeen villojen kuidut katkaistaan sopivan pituisiksi ja paksuisiksi. Tämän jälkeen päälle kaadetaan sidosainetta ja tuote kuumennetaan, jotta sidosaine muovautuisi kunnolla kuituihin kiinni. Mineraalivillojen heikkoutena voidaan pitää terveysriskejä, jotka johtuvat villoista irtoavista pienistä hiukkasista. Hiukkaset voivat aiheuttaa varsinkin allergisille ihmisille paljon hengitysvaikeuksia. [11.]

Erilaiset vaahtot, kuten metallivaahtot, polyeetterivaahtot ja polyesterivaahtot, eivät sisällä ollenkaan kuituja, jolloin ne soveltuvat paremmin tilanteisiin, joissa pitää ottaa tarkasti huomioon terveysriskit. Tämän lisäksi vaahtomateriaalit kestävät hyvin erilaisia sääolosuhteita ja ovat halpoja valmistaa. Vaimentavien vaahtojen taipuisuus on todella

hyvää luokkaa, ja siten niitä on myös helppo asentaa ja muokata, mutta villoihin verrattaessa niiden ominaisvirtausvastukset, jotka kertovat kuinka paljon aine hidastaa ilman kulkua materiaalissa, ovat paljon pienempiä. [11.]

Bitumia ja polymeerimassaa puolestaan käytetään yleisesti vaimentamaan runkoääniä ja värähtelyä rakenteissa. Molemmat materiaalit ovat raskaita ja erittäin tiivisrakenteisia. Bitumia kiinnittäessä kannattaa lämmittää sen pintaa, jolloin materiaali muuttuu erittäin elastiseksi ja samalla helpoksi kiinnittää. [12.]

3.2 Absorptio

Äänenvaimennusta suunniteltaessa materiaalissa tärkeintä on materiaalin paksuus sekä sen absorptiokerroin, jota kuvataan useimmiten merkillä alfa (α). Alfa pienin arvo on 0, jolloin materiaali heijastaa kaiken siihen kohdistuvan äänen takaisin ympäristöön. Suurin mahdollinen arvo on taas 1, jolloin vaimennusmateriaali imee kaiken siihen kohdistuneen äänen. Joskus voidaan käyttää myös prosenttilukuja, jolloin esimerkiksi 0,37 tarkoittaa, että 37 prosenttia materiaaliin kohdistuneesta äänestä absorboituu siihen. Absorptiopinta-ala αS on absorptiokertoimen ja pinta-alan S tulo. Jos absorptiokerroin on 0,6 ja vaimennettavan alueen pinta-ala 3 m^2 , saadaan absorptioalaksi $1,8 \text{ m}^2$. [6, s.15.]

Vaimentavassa materiaalissa ääni vaimenee lähinnä kahden syyn vaikutuksesta. Suuremmilla taajuuksilla suurin osa vaimennuksesta aiheutuu väliaineessa olevien molekyylien liikkeen aiheuttamasta kitkasta vaimentavassa materiaalissa. Ääniaallon suunnanmuutokset sekä supistuminen ja laajentuminen ääniaallon kulkiessa huokosten läpi aiheuttavat äänen vaimentumista materiaaliin. Pienemmillä taajuuksilla suurin äänen vaimentumiseen vaikuttava tekijä on liike-energiasta johtuva lämmön häviäminen. Kuiduissa oleva ilma laajenee ja supistuu vuorotellen ja aiheuttaa lämpötilan vaihteluita ja lämpöhäviöitä. [11.]

Vaimennukseen voidaan vaikuttaa myös vaimennusmateriaalin muotoilulla. Käytetyin pinnanmuoto vaimennusmateriaalissa on tasainen pinta, mutta myös mm. kiilamaisia, sylinterimäisiä, puolipallon muotoisia ja porrasmuotoisia muotoiluja käytetään. Pienemmillä paksuuksilla suositaan enemmän tasaisia pintoja ja suuremmilla paksuuksilla erilaisia pinnanmuotoja. Pinnan muotoilulla saadaan hajautettua ääniaallon heijastuksia.

Ääniaallon törmätessä vaimennusmateriaaliin tasaiseen pintaan osa ääniaallosta heijastuu takaisin päin vaimennusmateriaalista eikä absorboidu. Erilaisilla pinnan muodoilla saadaan kohdistettua vaimennusmateriaalista heijastunut ääniaalto ympäröivään vaimennusmateriaaliin, jolloin vaimennuksen tehokkuus paranee entisestään. [11.]

3.3 Matalat taajuudet

Normaalisti korkeampia yli 500 Hz:n taajuuksia on suhteellisen helppo vaimentaa. Ongelmaksi muodostuvat usein matalammat taajuudet ja äänen resonointi. Parhaimpia vaihtoehtoja matalien taajuuksien vaimentamiseen ovat ilmarako ja vaimennusmateriaalin tiiviys. Mitä suurempi ilmarako eli tyhjä tila vaimennusmateriaalin takana on, sitä paremmin tila suodattaa matalia taajuuksia. Yleensä joudutaan kuitenkin tyytymään kompromissiin tilan puutteen takia.

Projektissa ilmarakoa olisi voinut käyttää hyväksi rakentamalla puusta rimoitus laatikon jokaiselle seinämälle, jolloin laatikon seinämien vierustat olisivat ilmaa ja sitten ilmatilan päällä olisi varsinainen absorptiomateriaali. Tämä olisi kuitenkin lisännyt laatikon kokoa ja ollut muutenkin hankalasti toteutettavissa.

Sen sijaan käytettiin toista keinoa eli tiheyttä/massaa. Huokoinen materiaali estää hyvin korkeita taajuuksia, mutta päästää matalat resonoivat taajuudet läpi. Mitä korkeampi tiheys eli pinta-alamassa materiaalilla on tai vastaavasti, mitä paksumpi määrä ainetta, sitä paremmin materiaali vaimentaa matalia ääniä. Tässä projektissa käytettiin sekä huokoisia materiaaleja, että tiheitä materiaaleja.

4 Resonaattorit

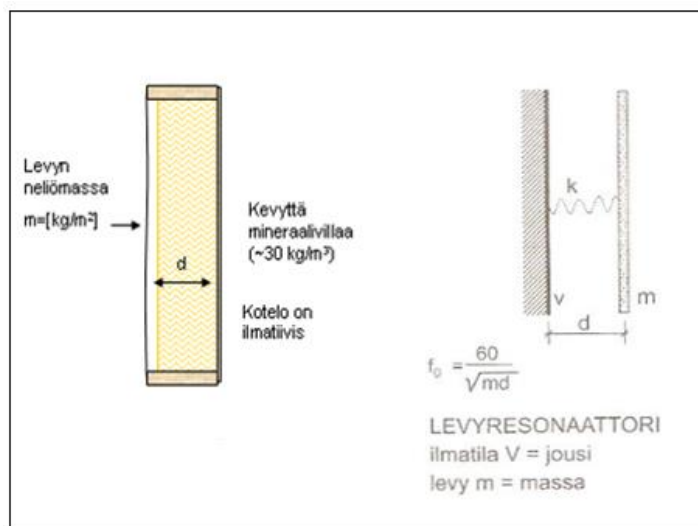
Huokoiset absorboivat materiaalit vaimentavat siis hyvin ääniä tietyistä taajuuksista ylöspäin, mutta ne ovat puolestaan huonoja vaimentamaan matalilla taajuuksilla, minkä takia resonaattoreita käytetään vaimentamaan ääniä matalilla taajuuksilla. Resonaattorit vaimentavat kuitenkin vain melko kapeaa äänialuetta. Resonaattorit värähtelevät tietyillä taajuuksilla isommalla amplitudilla kuin toisilla taajuuksilla. Kun äänilähteestä syntyvän

äänen taajuus on sama kuin resonaattorin viritetty taajuus, äänen energia muuttuu värähtelyn seurauksena liike-energiaksi ja siitä jälleen lämmöksi. [13.]

4.1 Levyresonaattori

Levyresonaattori koostuu kiinteästä ja tiivistä takalevystä, usein takaseinästä, jonka eteen jätetään ilmarako, ja tämän jälkeen tulee jälleen jokin tiivis, mutta joustava materiaali eteen. Ilmarako voidaan myös täyttää huokoisella vaimennusmateriaalilla, esimerkiksi mineraalivillalla, jolloin vaimennusta pystytään tehostamaan. [10, s. 211.]

Kun taajuus, joka on lähellä levyresonaattorin ominaisvärähtelytaajuutta, kohtaa resonaattorin, levy alkaa värähtelemään ja äänen synnyttämä energia alkaa muuttumaan lämmöksi vaimennusmateriaalissa. Resonaattorin vaimennuskerroin on suurimmillaan ominaisvärähtelytaajuudella, jolloin vaimennusmateriaali vaimentaa parhaiten juuri näitä taajuuksia. Levyresonaattori voidaan myös kuvitella tietynlaisena massa-jousi-rakenteena, jossa takaseinä toimii kiinteänä alustana ja välissä oleva ilma toimii jousena, joka liikuttelee joustavaa etulevyä kuvan 5 mukaisesti. [13.]



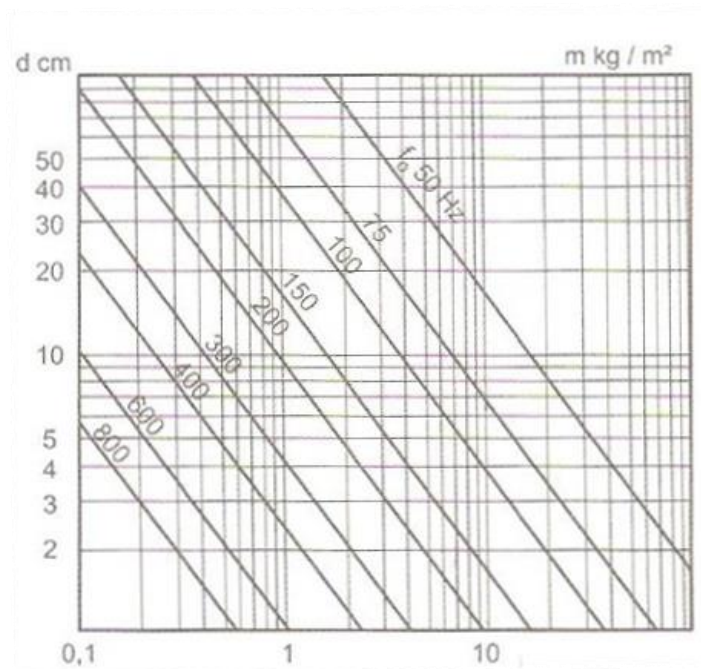
Kuva 5. Levyresonaattorin toimintaperiaate [10, s. 210; 13].

Levyresonaattorin ominaisvärähtelytaajuus pystytään laskemaan kaavalla 2

$$f = \frac{60}{\sqrt{(m \times d)}}, \quad (2)$$

jossa m on levyn neliömassa ja d on ilma-araon syvyys.

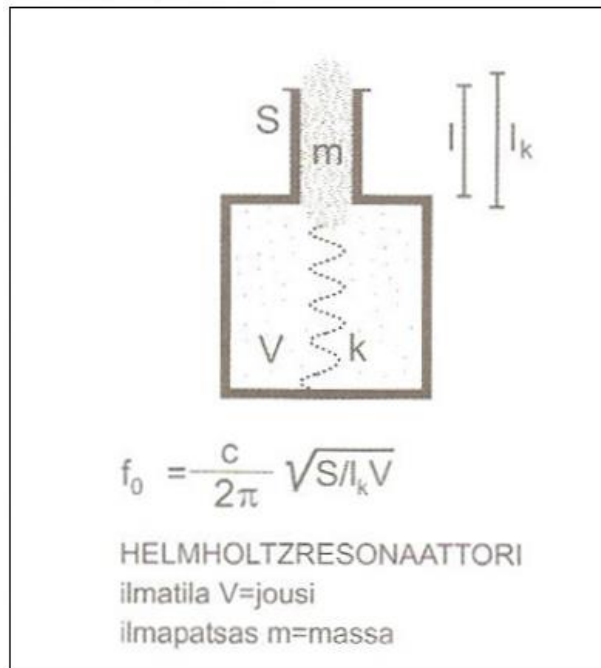
Kaavasta nähdään, että suurentamalla levyn neliömassaa ja ilma-araon suuruutta saadaan pienennettyä ominaisvärähtelytaajuutta. Kuvasta 6 pystytään lukemaan helposti levyresonaattorin ominaisvärähtelytaajuus, kun tunnetaan levyn massa m ja ilma-araon suuruus d . [13.]



Kuva 6. Levyresonaattorin ominaisvärähtelytaajuus. Kuvassa vaaka-akselilla on levyn paino m (kg/m^2) ja pystyakselilla ilma-araon suuruus (cm). Jos levyn paino on $2 \text{ kg}/\text{m}^2$ ja ilma-araon suuruus 20 cm , ominaistajuus on tällöin 100 Hz . [10, s. 211].

4.2 Helmholtz-resonaattori

Helmholtz-resonaattorissa resonanssi muodostuu säiliössä olevan ilman synnyttämästä akustisesta kapasitanssista sekä suuaukossa olevan ilmassan yhteisvaikutuksesta. Kaiuttomassa laatikkorakenteessa etuseinämään tehdään yksi reikä, jolloin itse laatikko toimii säiliönä ja reikä suuaukkona. Kuten levyresonaattorissa, myös Helmholtz-resonaattorissa toiminta voidaan kuvitella jousen ja massan yhteisvaikutuksena. Säiliössä oleva suljettu ilma toimii jousena, joka painuu välillä kasaan ilmanpaineen vaihtelun johdosta ja suuaukossa oleva ilma toimii massana aiheuttaen värähtelyä kuvan 7 mukaisesti. Kuvassa V on säiliön tilavuus, S on suuaukon pinta-ala, l on suuaukon pituus, ja k esittää joustua sekä m ilman massaa. [11.]



Kuva 7. Helmholtz-resonaattorin toimintaperiaate [10, s. 211].

Resonanssitaajuus pystytään laskemaan kaavasta 3

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}}, \quad (3)$$

jossa c on valon nopeus ilmassa. Koska pieni määrä ilmaa pääsee helposti poistumaan säiliön suuaukosta jokaisen värähtelykerran välillä, resonanssitaajuus pääsee helposti vääristymään hieman. Koska vääristymää voidaan pitää yhtä suurena, kuin tapausta, jossa suuaukon pituus l olisi hieman pidempi, vääristymä voidaan korjata kaavalla 4

$$l_k = l + \frac{4}{5}\sqrt{S}, \quad (4)$$

jolloin saadaan luotettavampi lukuarvo suuaukon pituudelle l_k . [14.]

4.3 Reikäresonaattori

Reikäresonaattorissa saadaan aikaan laajempi vaimennusalue, kuin muissa resonaattoreissa, sillä se koostuu useasta pienemmästä Helmholtz-resonaattorista, jossa väliseinät

on poistettu. Rei'itetyn levyn reikien halkaisijat ovat vain millimetrin luokkaa, jolloin ilman viskositeetti pääsee aiheuttamaan akustisia häviöitä vastustamalla ilman liikettä rei'issä. Levyresonaattorit ja Heimholtz-resonaattorit soveltuvat parhaiten matalien taajuuksien vaimentamiseen, kun taas reikäresonaattoreiden ominaisin vaimennustaajuualue on matalista taajuuksista keskikorkeisiin. Reikäresonaattorin reiät voivat olla myös pitkien rakojen muotoisia, jolloin puhutaan rakoresonaattorista. [10, s. 211 - 212; 11.]

Reikäresonaattorin suurimpia vahvuuksia ovat sen eri mahdollisuudet vaikuttaa resonaattorin virittämiseen. Ominaisvärähtelytaajuuteen pystytään vaikuttamaan muuttamalla ilmaraon syvyyttä ja reikien kokoa sekä etulevyn paksuudella. Myöskin etulevyn perforaatioaste eli reikien määrä vaikuttaa lopputulokseen. Kuten muissakin resonaattoreissa, myös reikäresonaattorissa tehokkuutta voidaan parantaa asentamalla ilmaraokoon huokoista absorptiomateriaalia. Toisin kuin Helmholtz-resonaattorissa, reikäresonaattorin maksimivaimennus ei vähene tämän seurauksena, mutta sillä saadaan siirrettyä vaimennettavaa taajuusalueta vielä pienemmille taajuuksille. Absorptiomateriaalia voidaan myös laittaa reikälevyn päälle, jolloin saadaan nostettua suurempien taajuuksien vaimennusta, mutta tällöin itse reikäresonaattorin maksimivaimennus laskee tämän seurauksena. [11.]

5 Vaimennuslaatikon rakentaminen

Pumppujen ja moduulien testaamista varten rakennettiin vanerilevyistä kaappi, jossa pystytään testaamaan pumppujen äänekkyttä. Laatikosta tuli suorakulmion muotoinen, ulkomitoiltaan $49 \times 37 \times 37 \text{ cm}^3$, ja vanerin paksuus on 18 mm kauttaaltaan. Laatikon kaikki reunat tiivistettiin huolellisesti tiivisteliimalla, jotta ääni ei pääse kiertämään mitään kautta ulos tai sisään. Laatikon etuosa leikattiin auki päästä, ja siitä tehtiin oviosa, ja oveen ja laatikkoon lisättiin tiivistenauha lisäämään tiiviyyttä. Laatikon sisäosa vuorattiin vaimennusmateriaaleilla, joita käsitellään myöhemmin lisää. Laatikon takaseinään porattiin reikä mikrofoniille ja se tiivistettiin tiivistenauhalla, jotteivät runkoäännet johtaisi suoraan mikrofoniin ja näin aiheuttaisi häiriöitä mittaustuloksiin. Sivuseinään tehtiin samalla periaatteella reikä sähköjohdoille ja paineletkuille, jotka menevät testattavalle laitteelle.

5.1 Mikrofoni

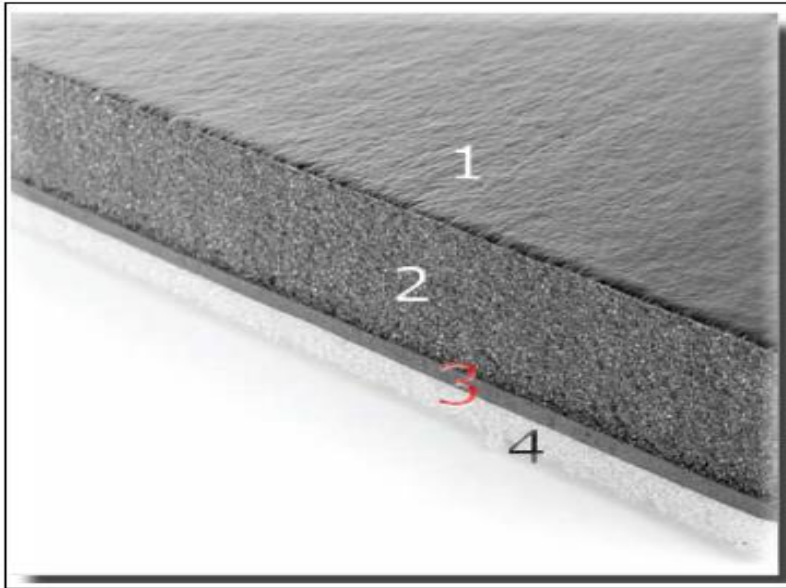
Mikrofonina mittauksissa käytettiin MiniDSP:n UMIK-1 mikrofonia, joka on suunniteltu nimenomaan mittamikrofoniksi. UMIK-1 on USB-mikrofoni, joten emme tarvinneet erikseen ulkoista virtalähdettä tai erillistä äänikorttia, kuten useimmissa mikrofoneissa tarvitaan. Tämä olikin suurin syy, miksi haluttiin ja valitsittiin USB-mikrofoni. Tietokone tunnistaa automaattisesti mikrofonin ja osaa yhdistää sen suoraan käyttämäämme LabVIEW- ohjelmaan. Mikrofonin suuntakuvio on pallon muotoinen, eli se havaitsee äänen mikrofonin joka suunnalta. Taajuusvaste ylittää 20 Hz:stä aina 20 kHz:iin asti. [15.]

Testeissä käytettiin apuna myös RION NA-28 -äänitasomittaria antamaan tarkkoja desibelilukemia ja toimimaan vertailumittarina tarvittaessa.

5.2 Vaimennusmateriaali

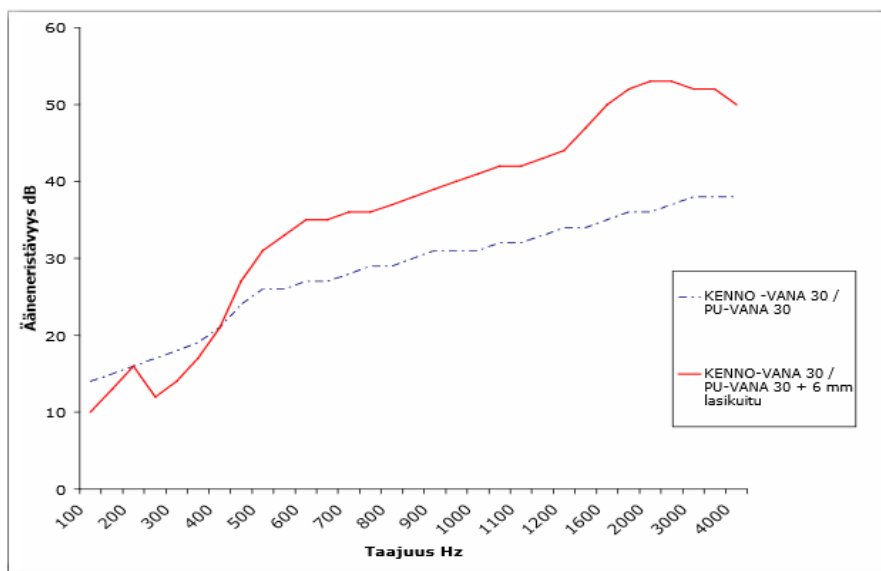
Laatikon sisäosa vuorattiin ensin 4 mm paksulla bitumilevyllä, jolla saadaan hyvin vaimennettua matalataajuisia rungosta johtuvia värähtelyääniä. Bitumin keskimääräinen ilmaeristävyys on n. 35 dB(A). Bitumilevyn päälle asetimme varsinaisena vaimennusmateriaalina käyttämämme PU-VANA 30:n. PU-VANA on monesta eri kerroksesta koostuva vaahtomuovi, joka sisältää sekä huokoista että tiivistä materiaalia. Materiaali soveltuu täten hyvin sekä matalien että korkeampien taajuuksien vaimentamiseen. Vaimentavan materiaalin paksuus on keskimäärin 30 millimetriä.

Kuvan 8 mukaisesti ylin pintakerros on polyuretaania, jonka jälkeen tulee varsinainen vaimennuskerros, joka on polyeetterivaahtoa. Tämän jälkeen tulee tiivis kaistale mineraalisekoitteista polymeerimassaa, joka on hieman vastaavaa kuin bitumi ja suodattaa täten hyvin ääniä matalilla taajuuksilla. Vaimennusmateriaalin pohjalla on vielä pieni kerros polyeetterivaahtoa. [16.]



Kuva 8. PU-VANA 30 [16].

PU-VANA:n keskimääräinen eristävyys on n. 40 desibeliä, kun materiaali on liimattu 6 mm paksun lasikuidun päälle tai 9 mm paksun vanerin päälle. Tässä projektissa käytimme 18 mm paksua vaneria, jolloin voidaan olettaa, että keskimääräinen eristävyys on vähintään 40 dB (A). Kuvassa 9 havainnollistetaan PU-VANA:n eristävyttä eri taajuuksilla. Sininen katkoviiva kuvaa tilannetta, jossa vahtomuovin alla ei ole muuta eristettä, ja punainen viiva taas tilannetta, jossa vahtomuovi on kiinnitetty 6 mm:n lasikuitulevyyn.



Kuva 9. PU-VANA 30:n eristävyys eri taajuuksilla [16].

5.3 Testattavan laitteen kiinnitys

Kaiuttoman tilan suunnittelussa pitää ottaa huomioon myös testattavan laitteen asentaminen tilaan siten, ettei itse kiinnitys häiritse mittaustuloksia. Laitetta ei voida sijoittaa suoraan lattialle tai laatikon pohjalle, koska laitteesta syntyvä mekaaninen värähtely johtuu runkorakenteisiin ja saa täten myös rungon värähtelemään ja tuottamaan ääntä tilan sisälle. Tällöin rungon tuottama ääni pääsee vaikuttamaan mittaustuloksiin häiritsevästi. Laitte voidaan mm. kiinnittää johtojen tai jousien varaan tai sitten pohjalle voidaan rakentaa mahdollisimman resonoimattomasta materiaalista koroke, johon laite voidaan sijoittaa. Tässä projektissa pohdittiin paljon erilaisia vaihtoehtoja.

Yhtenä mahdollisuutena oli ”pingottaa” laatikon molemmista reunoista johdot keskelle, jonne itse laite olisi sitten sidottu. Tämä olisi muuten ollut erittäin hyvä keino varsinkin resonanssin vähäisyyden kannalta, mutta ongelmaksi olisi tullut laitteen hankala kiinnittäminen. Testilaitteen on tarkoitus tulla yleiseen käyttöön, jolloin kuka tahansa voi käyttää mittauslaitetta tehtaan tiloissa ja sillä voidaan testata useita laitteita päivän aikana. Tällöin myös kiinnityksen pitää olla mahdollisimman yksinkertainen ja nopeasti toteutettava.

Jousirakenteessa pystytään helposti asentamaan jouset haluttuihin kohtiin. Yhdenlainen ajatus oli laittaa jouset roikkumaan katosta, ja toisessa päässä olisi ollut metallilevy, johon testattava laite olisi asennettu. Tällöin laite olisi kuitenkin jäänyt suhteellisen ylhäälle laatikossa, ja laitteen asettaminen paikalleen olisi ollut hankalaa. Päädyimme ratkaisuun jossa metallilevyn jokaiseen reunaan porattiin reiät, joihin kiinnitettiin jouset. Jousien toiset päät kiinnitettiin ruuveilla kiinni puurungon kahdelle sivulle (kuva 10), ja metallilevy jää roikkumaan muutaman senttimetrin korkeudelle laatikon pohjasta, kun moduuli on asetettuna metallilevyn päällä. Samalla mikrofonin paikka takana mitoitettiin samalle korkeudelle moduulin keskikohdan kanssa. Tällöin testattaessa pelkkää pumppua, joka on varsinaista laitetta huomattavasti kevyempi, asettuu pumppu myös hyvin mikrofonin kohdalle.



Kuva 10. Pumppujen alustana käytettävän metallilevyn kiinnittäminen jousien varaan.

Metallilevyä käytetään pumpun alla, koska testissä tarvitaan kaikupohjaa. Tehtaan linjastolla pumppuja testattaessa pumppu pidetään usein pöydällä, jonka päällisenä on antistaattista muovimateriaalia. Pöydällä pumpun mekaaninen värähtelevä ääni ei kuitenkaan kuulu kunnolla. Tämän takia pumppu nostetaan usein testeissä käytettävän testerin metallisen kuoren päälle, josta saadaan realistisempi kuva pumpun äänekkyudesta. Laitettaessa pumppu moduulin sisälle pumppu koskettaa moduulin runkoa ja synnyttää samanlaisen tai hieman voimakkaamman värähtelevän äänen. Samalla periaatteella käytäytyy myös itse moduuli, kun se kiinnitetään potilasvalvontamonitoriin kiinni. Käyttämällä metallilevyä alustana, pyritään saamaan aikaan samanlainen tarkastelutilanne, kuin pumpun ollessa kiinni moduulissa.

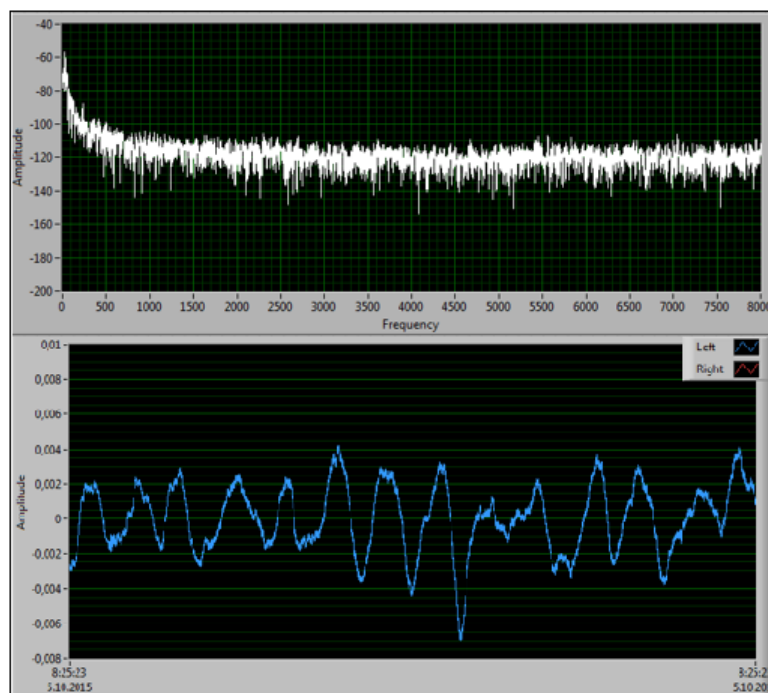
6 Testaaminen ja analysointi

6.1 Vaimennusmateriaalin testaaminen

Vaimennuskerroksia lisättäessä tehtiin havainnollistavia mittauksia vaimennusmateriaalin vaikutuksesta vaimennukseen. Mittaukset suoritettiin normaalissa työskentelytilan melussa. Ympäröivän tilan äänen voimakkuus ei pysynyt koko aikaa stabiilina, jolloin myös ympäristön äänet vaikuttivat hieman tuloksiin. Mittaukset pyrittiin kuitenkin teke-

mään mahdollisimman samankaltaisissa tilanteissa äänen suhteen. Ensimmäiset mitaukset mikrofonilla tehtiin kaapin ulkopuolella, ja tuloksista näki heti, että suurimmat desibelilukemat syntyivät matalilla alle 100 Hz:n taajuuksilla, ja parhaimmillaan desibelilukemat olivat alle 60 desibeliä maksimiarvosta, kuten kuvasta 11 huomataan. 500 Hz:n jälkeen lukemat tasoittuivat likimain lukemaan -120 dBFS eli 120 desibeliä maksimitasosta.

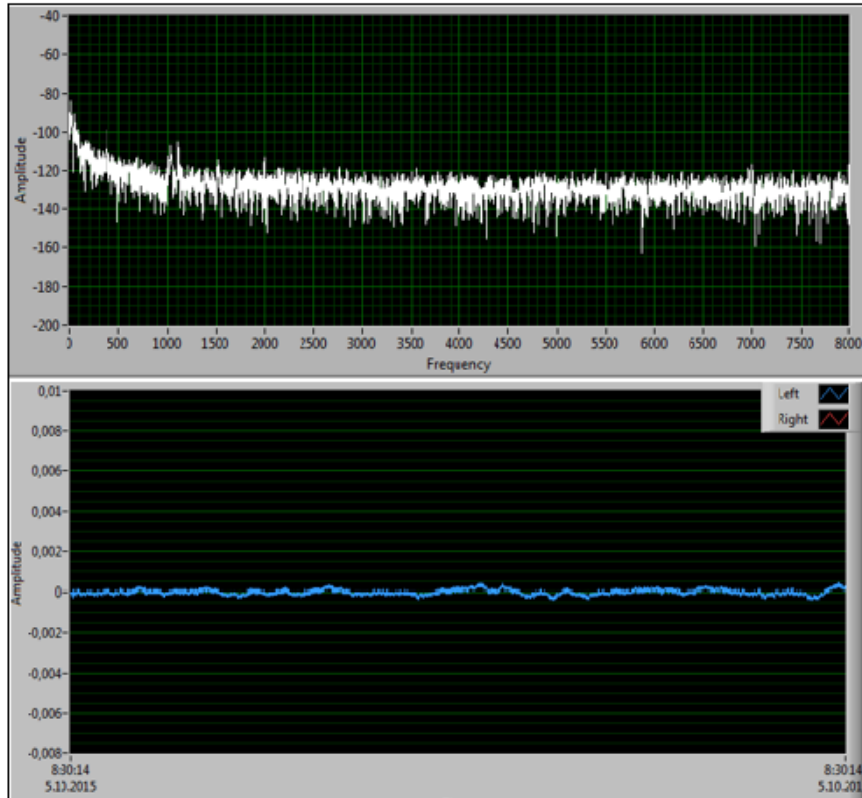
Kuvassa 11 alemmassa kohtaa (sininen viiva) on puhdas suodattamaton signaali, joka tulee suoraan mikrofonilta. Signaalissa on kuvattu aikavaste yhden sekunnin aikana. Vaaka-akselilla on aika ja pystyakselilla signaalin amplitudi. Ylemmässä kohtaa (valkoinen viiva) signaalille on tehty Fourier-muunnos (Fast Fourier Transform), jolloin saadaan äänen spektri esille eli tilannetta voidaan tarkastella taajuustasossa. Vaaka-akselilla näkyy taajuus välillä 0 - 8000 Hz ja pystyakselilla amplitudi dBFS-arvona.



Kuva 11. Taajuusvaste (valkoinen viiva) sekä aikavaste (sininen viiva), kun mikrofoni mittaa kaapin ulkopuolista melua.

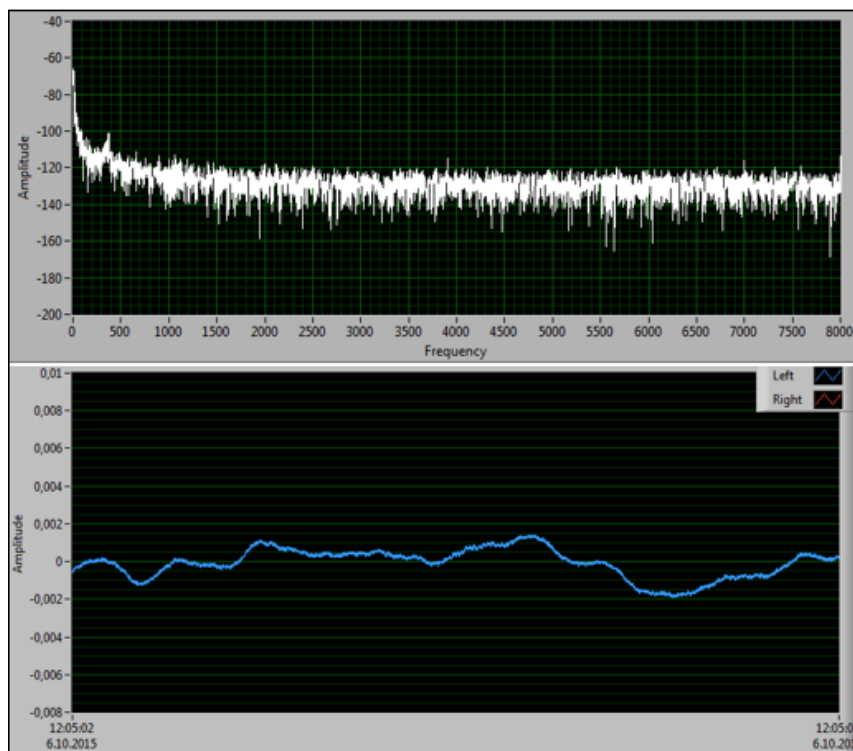
Laitettaessa mikrofoni vanerilaatikkoon ilman muita vaimennusmateriaaleja huomataan heti, että matalimmilla taajuuksilla vaimennus paranee heti hieman yli 20 desibeliä, kuten kuvasta 12 huomataan. Suuremmilla taajuuksilla vaikutus ei ole läheskään yhtä suuri,

mutta kuvista huomaa kuitenkin, että spektri tasoittuu huomattavasti ja suuremmilla taajuuksilla (500 Hz ylöspäin) vaimennus paranee keskimäärin 10 desibeliä. Pelkkä vanerikerros auttaa jo yksistään todella hyvin äänenvaimennuksessa.



Kuva 12. Taajuusvaste (valkoinen viiva) ja aikavaste (sininen viiva), kun mikrofoni on kaapin sisällä vanerivaimennuksessa.

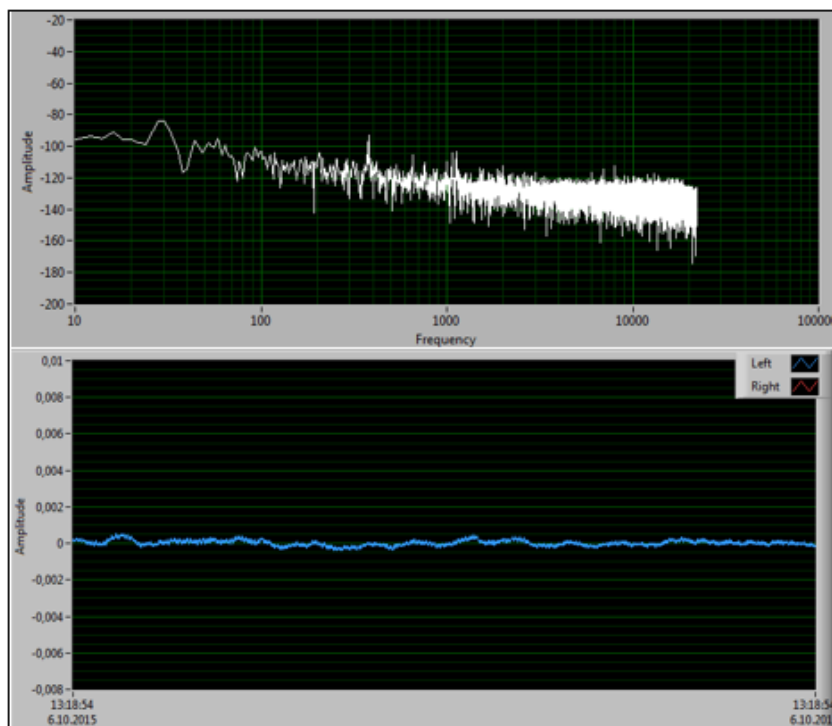
Seuraavassa tilanteessa laatikko on vuorattu bitumilla kauttaaltaan ja sähköjohtoille on tehty reikä laatikon etureunaan. Reikä ei ole kuitenkaan aivan kokonaan umpinainen, sillä laatikon sisäpuolelta bitumi peittää reiän. Mittauksista huomataan, että hieman yllättäen tilanne onkin huonontunut aivan matalimpien taajuuksien (alle 100 Hz) kohdalla, kuten kuvasta 13 huomataan. Myös amplitudi on kasvanut selvästi tilanteesta, jossa reikää ei vielä ollut. Suuremmilla taajuuksilla mitään huomattavaa muutosta ei ole tapahtunut.



Kuva 13. Taajuusvaste (valkoinen viiva) ja aikavaste (sininen viiva), kun vaimennuslaatikko on eristetty kauttaaltaan bitumilla ja kyljessä on pieni reikä sähköjohdoille.

Seuraavissa kuvissa taajuusasteikko on muutettu logaritmiseen muotoon, jotta pystyttäisiin paremmin havaitsemaan matalissa taajuuksissa tapahtuneet muutokset, koska mitauksista huomattiin, että suurin ongelma ja muutos vaimennuksessa koskevat matalia taajuuksia.

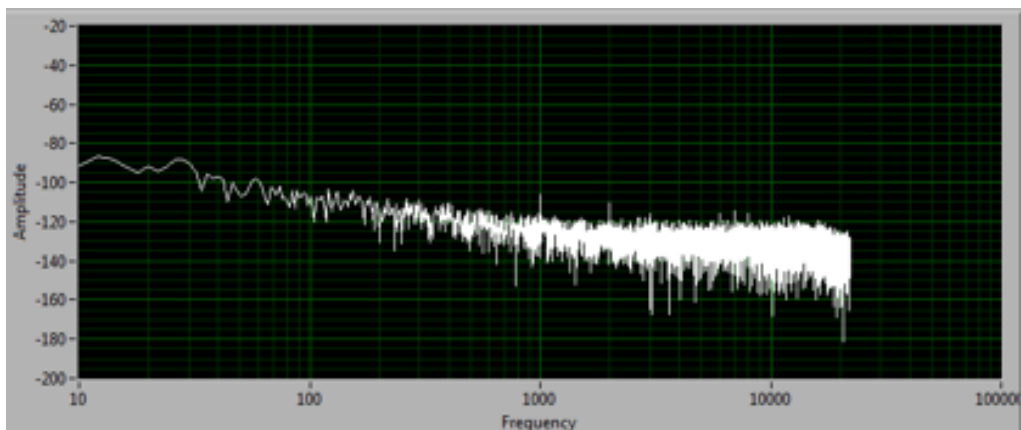
Reiän kohdalta poistettiin hieman bitumia, jotta sähköjohdot mahtuisivat siitä läpi. Tämän jälkeen reiän kohdalle laitettiin tiivistenauhaa kerälle ja reikä tukittiin kunnolla. Kuten kuvasta 14 huomataan, alle 100 Hz:n taajuuksilla tapahtuu selkeä parannus aikaisempaan tilanteeseen. Varsinkin aikavasteesta näkyvää amplitudia saadaan pienennettyä merkittävästi tasaisemmaksi.



Kuva 14. Taajuusvaste (valkoinen viiva) ja aikavaste (sininen viiva), kun vaimennuslaatikon kyljessä oleva pieni reikä on tukittu tiivistenauhalla.

Tästä voidaan päätellä, että vaikka vaimennusmateriaalin kokonaispaksuus nousisikin niin suuremmissa ja tärkeämmässä asemassa on laatikon tiiveys ja se, ettei mistään raosta pääsisi vuotamaan yhtään ääntä laatikon sisäpuolelle.

Viimeiseksi testilaatikko päällystettiin varsinaisella vaimennusmateriaalilla eli PU-VANA-vahtomuovilla. Vaahtomuovin palat leikattiin etukäteen oikeaan kokoon, jotta varmistuttiin siitä, ettei synny mahdollisia rakoja, joissa ääni pääsee kulkemaan. Palat liimattiin kiinni alustaan sprayliimalla, jotta varmistuttiin kunnollisesta kiinnityksestä. Kuvasta 15 huomataan, että vaimennusmateriaalilla saadaan aikaan pientä tasoittumista spektrissä, jolloin amplitudihuiput pysyvät matalampina.



Kuva 15. Mikrofonin antama taajuusvaste vaimennuslaatikon sisältä, kun vaimennuslaatikko on vuorattu kokonaan vaimentavalla materiaalilla.

Pientä taustamelua esiintyy edelleen, varsinkin matalammilla taajuuksilla. Korkeammilla taajuuksilla, joita huokoiset materiaalit vaimentavat enemmän, tulokset eivät näy kunnolla. Vaimennuslaatikon ulkopuolelta kantautuva melu on taajuudeltaan matalatasoista, jolloin korkeampien taajuuksien vaimennus on jo lähellä nollassa. Kuvassa 16 nähdään vaimennuslaatikko, joka on vuorattu kokonaan vaimennusmateriaaleilla. Yhteensä vaimentavaa materiaalia on paksuudeltaan noin 52 mm laatikon jokaisella seinämällä.



Kuva 16. Vaimennuslaatikko etupuolelta kuvattuna.

Äänenpainetasot mitattiin desibelimitarilla sekä vaimennuslaatikon sisäpuolelta että ulkopuolelta. Vaimennuslaatikon ulkopuolella keskimääräinen äänenpainetaso oli 46

dB(A) ja sisäpuolella 16 dB(A), jolloin keskimääräinen vaimennus on n. 30 desibeliä. Sisäpuolella oleva 16 desibeliä vastaa äänenvoimakkuudeltaan suurin piirtein samaa, kuin lehtien havina tai hiljainen kuiskaus. PU-VANA-30:n datalehdessä kuvassa 9 mainitaan, että vaahtomuovin keskimääräinen vaimennus on n. 40 desibeliä. Matalammilla taajuuksilla vaimennus on kuitenkin selvästi matalampi. Aikaisemmin tehdyissä mittauksissa huomattiin, että suurimmat äänenpainetasot sijoittuivat juuri näille matalille taajuuksille, jolloin 30 desibelin keskimääräistä vaimennusta voidaan pitää hyvin onnistuneena.

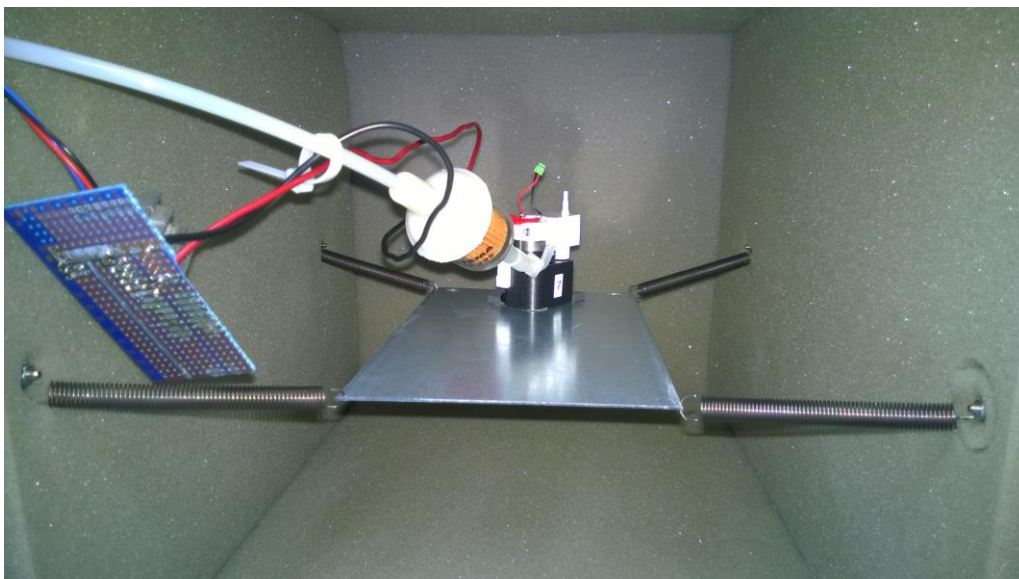
6.2 Pumppujen testaaminen

Erilaisia äänekkäitä pumppuja oli keräilty jo etukäteen valmiiksi testejä varten. Pumput valittiin siten, että saadaan mahdollisimman laaja kategoria erilaisia äänekkäitä pumppuja testiin, jolloin pystytään näkemään, onko eri pumpuilla erilaisia vaikutuksia taajuusvasteeseen. Mukaan otettiin myös muutamia erittäin hiljaisia pumppua, joista saadaan vertailutasot hyvälle pumpuille sekä pumppuja, jotka ovat äänen kannalta rajoilla, mutta lasketaan silti hyväksi.

Pumppujen testaaminen toteutetaan LabVIEW -ohjelmistolla tehdyllä ohjelmalla ja siihen liitettyllä elektroniikalla. Kyseinen kokonaisuus oli yrityksellä valmiina jo etukäteen. Ohjelmaan syötetään haluttu pumpun läpivirtaus sekä alipaine. Ohjelmassa huomioidaan myös aina vallitseva ilmanpaine. Kun kaikki halutut arvot on syötetty ohjelmistoon, ohjelmisto alkaa säätämään pumpun jännitettä sekä venttiiliin asentoa, joilla saadaan säädettyä läpivirtausta ja pumpun painetta. Kun halutut arvot on saavutettu, siirrytään tarkkailemaan mikrofoniin antamaa taajuusvastetta. Mikrofonin on kiinnitettynä tietokoneeseen, johon on asennettuna LabVIEW -ohjelma, jolla mitataan mikrofoniin antamaa raakasignaalia. Signaalille tehdään Fourier-muunnos, jolloin saadaan äänen spektri esille eli tilannetta voidaan tarkastella taajuustasossa. Tavoitteena oli löytää signaalitasoista merkittäviä ja toistuvia eroavaisuuksia hiljaisten pumppujen ja äänekkäiden pumppujen kesken.

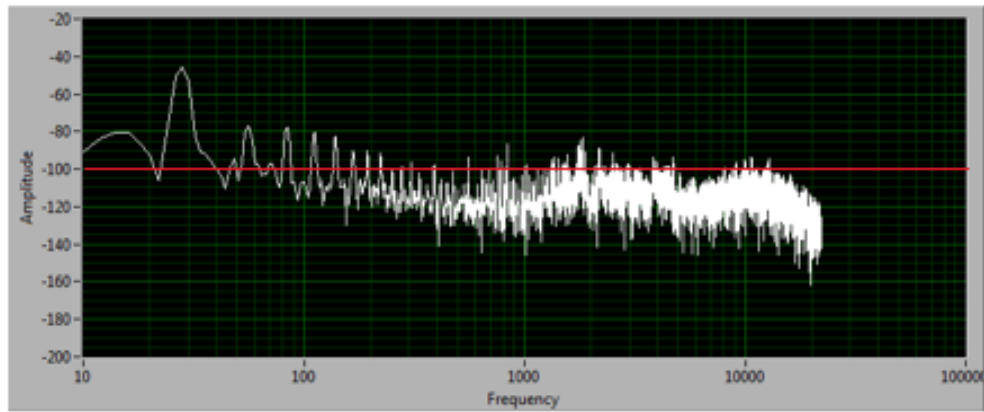
Ensimmäiseksi testattiin äänekkyydeltään mahdollisimman eri kuuloisia pumppuja jotta nähtäisiin, mille tasoille desibelilukemat asettuvat ja millaisia taajuusvasteita pumput antavat. Pumput asetettiin kuvan 17 mukaisesti vaimennuslaatikon perälle mahdollisimman lähelle mikrofonia. Kuvassa mikrofonin on pumpun takana. Pumput asetettiin joka kerta

samaan kohtaan metallilevyä, jotta saataisiin mahdollisimman samankaltainen mittaus-tilanne jokaiselle pumpulle. Mittauksista huomataan heti, että suurin yksittäinen äänen-painepeikki tulee noin 30 Hz:n kohdalle ja tällöin ylletään melkein 40 desibelin päähän maksimiarvosta. Sama tilanne toistui jokaisen pumpun kohdalla suurin piirtein yhtä voi-makkaana pumpun äänekkyydestä huolimatta. Matalammilla alle 1 kHz:n taajuuksilla taajuusvasteissa ei näy minkäänlaisia toistuvia eroja hiljaisten ja äänekkäiden pumppu-jen välillä.



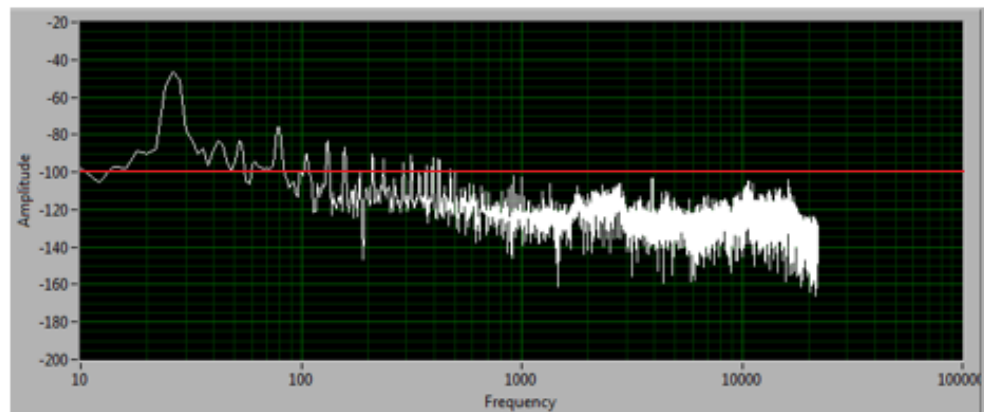
Kuva 17. Testauksessa oleva pumppu.

Kun tarkastellaan tarkemmin pumpuista saatavia spektrejä, suurimmat yksittäiset eroa-
vaisuudet spektreissä nähdään 2 kHz:n kohdalla. Tästä syystä lähempään tarkasteluun
otettiin -100 dBFS:n raja ja taajuudeksi 2 kHz ja sen lähitaajuudet. Kuvissa 18 ja 19 on
esitelty esimerkit äänekkästä ja hiljaisesta pumpusta. Hiljaisiksi luokitelluilla pumpuilla
spektri jää näillä kohdin selvästi alle -100 dBFS, kun taas suurella osalla äänekkäistä
pumpuista spektri kohoaa kyseisen lukeman yläpuolelle.



Kuva 18. Taajuusvaste äänekkään pumpun kohdalla. Punainen viiva kuvaa -100 dBFS:n rajaa.

Äänekkään pumpun kohdalla 2 kHz:n tietämillä olevat taajuudet ylittävät reilusti monella eri taajuudella asetetun -100 dBFS:n rajan. Vertailemalla kuvaa alempana olevaan hiljaiseen pumppuun nähdään selvä ero 1000 - 10 000 Hz:n välillä. Hiljaisen pumpun kohdalla amplitudihuiput jäävät kyseisillä kohdilla selvästi pienemmiksi kuin äänekkäillä pumpuilla.



Kuva 19. Taajuusvaste hiljaisen pumpun kohdalla. Punainen viiva kuvaa -100 dBFS:n rajaa.

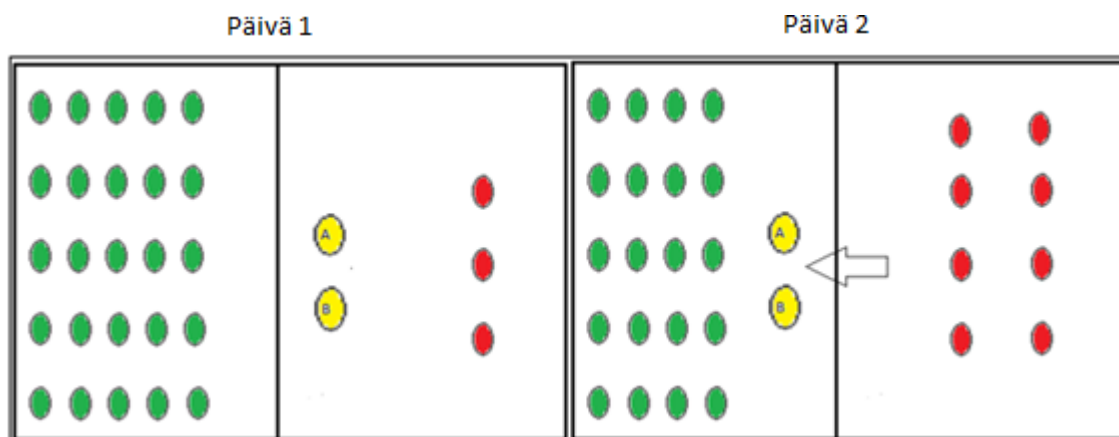
Testissä testattiin yhteensä 15 pumppua, joiden taajuusvastetta tarkkailtiin. Taajuusvas- teiden perusteella pumpuista 4 kappaletta oli äänekkyydeltään hiljaisia, 5 kappaletta oli rajoilla ja 6 kappaletta oli selkeästi äänekkäitä. Varsinainen ongelma pumppujen äänekkyyden testauksessa on rajalla olevien pumppujen kanssa. Ristiriitaiset pumput, jotka jäävät hiljaisten ja äänekkäiden välimaastoon ja ovat täten epäselviä tapauksia, vaativat selkeän rajan, joka kertoo, onko pumppu änekäs vai ei. Äänekkyydeltään ääripäissä

sijaitsevat pumpput taas on yleisesti ottaen helppo havaita jo pelkästään kuuntelemalla niitä kokoonpanolinjalla.

On tärkeää, että äänekkäät pumpput saataisiin karsittua pois jo ennen kuin ne laitetaan sisälle laitteeseen. Laitteen sisällä pumppujen ääni kuuluu yleensä hieman korkeampana, koska siellä pumppu pääsee resonoimaan laitteen runkoa vastaan. Valmiit laitteet testataan aina esitesterillä, minkä jälkeen ne menevät lämpökaappiin 3 - 4 päiväksi ja sieltä laadunvarmistukseen. Jos pumppu havaitaan äänekkääksi esitestauksessa, laite joudutaan avaamaan ja pumppu joudutaan purkamaan pois laitteesta ja vaihtamaan uuteen. Tämän jälkeen testaus suoritetaan uudelleen. Laadunvarmistuksessa koko laite joudutaan viemään takaisin tuotantoon korjattavaksi ja uudelleen lämpökaapitettavaksi, jos pumppu joudutaan vaihtamaan äänekkyyden vuoksi. Mitä pidemmälle laitteen valmistuksessa äänekkäs pumppu siis etenee, sitä enemmän aikaa ja vaivaa sen vaihtaminen uuteen vie.

Pumppujen nykyisessä testaamisessa suurin ongelma on se, että pumppujen liialliselle äänekkyydelle ei ole annettu minkäänlaista tiettyä rajaa. Testi perustuu ainoastaan testaajan omaan kuuloon ja siihen, onko pumppu hänen mielestään äänekkäs vai ei. Testaajalle muodostuu jonkinlainen käsitys siitä, missä raja kulkee, hänen testattuaan erikuisia pumppuja. Sen lisäksi muiden jo testattujen pumppujen äänet ja lopputulokset vaikuttavat tietyllä tapaa testissä olevaan pumppuun. Pumppuja vertaillaan aina toisiin pumppuihin. Seuraava tilanne on täysin hypoteettinen, mutta antaa kuvan siitä, kuinka pumppujen lajittelu toimii päivittäin.

Ensimmäisessä tilanteessa päivän aikana pumpuista 25 kappaletta oli hiljaisia, kolme äänekkäitä ja kaksi (A ja B) epäselviä. Epäselvät pumpput laitettiin tässä tapauksessa äänekkäiden pumppujen joukkoon, koska selvästi äänekkäitä pumppuja oli normaalia vähemmän, jolloin lievästi äänekkäät pumpput ”pomppaavat” helpommin esiin ja täten laitetaan helpommin äänekkäiden joukkoon. Seuraavana päivänä äänekkäitä pumppuja onkin normaalia enemmän eli kahdeksan. Kaksi epäselvää pumppua ovat täysin samat, kuin eilenkin, ja ne ovat edelleen yhtä äänekkäitä. Koska hyviä hiljaisia pumppuja on kuitenkin tulleet päivän aikana vähemmän kuin normaalisti, kaksi rajatapausta siirtyvätkin nyt helposti hiljaisten pumppujen joukkoon. Kuvassa 20 esitetään edellä mainittu tilanne, jossa vihreät pallot esittävät hiljaisia pumppuja, keltaiset rajatapauksia ja punaiset äänekkäitä pumppuja.



Kuva 20. Havainnekuva äänen suhteen "rajalla" olevien pumppujen sijoittumisesta.

Tilanne perustuu siihen, että testaajalle muodostuu helposti rutiini siitä, kuinka monta hyvää pumppua päivän aikana suurin piirtein tulee testattavaksi, ja siihen, että vain hieman äänekkäät pumput kuulostavat selkeästi paremmilta kuin selvästi äänekkäät pumput. Jos pumppuja hylätään paljon, hieman änekäs pumppu kuulostaakin ihan hyvältä, ja se laitetaan hiljaisten pumppujen joukkoon ja sama toimii päinvastoin.

Samalla lailla käy silloin, kun testataan monta pumppua peräkkäin ja monen änekkään pumpun jälkeen tulee yksi hieman hiljaisempi yksilö. Tämä yksilö laitetaan helpommin hiljaisten pumppujen joukkoon kuin tilanteessa, jossa monen hiljaisen pumpun jälkeen tulee kyseinen rajayksilö. Tällöin kyseinen pumppu laitettaisiin luultavimmin änekkäiden pumppujen joukkoon. Myös kiire ja valmistettavien laitteiden määrä voivat vaikuttavaa osittain siihen, kumpaan kategoriaan pumppu laitetaan. Änekkään pumpun tilalle joudutaan aina testaamaan uusi hyvä pumppu, ja päivän päätteeksi hylättyjen pumppujen tilalle pitää koota lisää pumppuja.

Jotta saataisiin jonkinlaista varmistusta siitä, mitkä pumput ovat änekkäitä ja missä kulkee hiljaisen ja änekkään pumpun raja, pumput kuunneltiin läpi vielä kerran kolmen henkilön toimesta. Pumput numeroitiin ja testaaja kuunteli pumppujen äänet ja merkitsi paperille, onko pumppu hänen mielestään hiljainen vai änekäs. Testitilanteessa pumppu laitettiin metallisen testerin päälle ja eikä pumppua saanut painaa testin aikana. Testitilanteen aikana taustamelu (lämpökaapit, testerit ja puhe) pyrittiin pitämään samankaltaisina ja mahdollisimman vähäisenä. Testaajien yksittäiset tulokset löytyvät liitteestä 1.

Pumppujen äänekkyyttä testattiin myös mittaamalla niiden aiheuttamat äänenpainetasot, eli desibeliarvot. Mittarina käytettiin Rion NA-28 -desibelimittaria. Desibelimittarin mittapää vaihdettiin mikrofonin tilalle vaimennuslaatikon takaosaan. Tämän jälkeen pumput testattiin yksitellen ja desibeliarvot otettiin ylös. Desibeliarvot vaihtelivat aina hieman mittauksen aikana, ja tästä syystä lopputuloksiin merkattiinkin keskiarvollinen desibelilukema.

Taulukosta 2 nähdään yhteenveto äänekkyytestien tuloksista. Punaisella värillä merkattut ovat hylättyjä pumppuja, keltaisella värillä merkattut ovat äänen suhteen rajoilla olevia ja vihreällä merkattut ovat hiljaisia pumppuja.

Taulukko 2. Yhteenveto äänekkyytestien tuloksista.

Pumppu	dB	Äänekkyytesti	Taajuustesti	Lopputulokset
1.	45,5			
2.	39,5			
3.	50,3	x	x	x
4.	40,8			
5.	46			
6.	51,3	x	x	x
7.	43,9			
8.	50,1	x	x	x
9.	44,4	x		x
10.	41,3			
11.	48	x	x	x
12.	47	x		x
13.	45,4			
14.	47,8	x	x	x
15.	50	x	x	x

Ensimmäisessä sarakkeessa on merkattu pumpun numero, minkä jälkeen tulevat arvot desibelitesteistä. Kolmannessa sarakkeessa on tehty yhteenveto äänekkyytestien tuloksista, jossa kolme henkilöä kuunteli pumput läpi. Vihreäksi merkattiin pumput, jotka olivat kaikkien mielestä hiljaisia, keltaiseksi pumput tilanteissa, joissa yksi henkilö oli sitä mieltä, että kyseinen pumppu on äänekkäs, ja punaiseksi pumput, joissa 2/3-osaa tai kaikki olivat sitä mieltä, että se on äänekkäs. Taajuustestissä tarkkailtiin 1 - 10 kHz:n taajuusalueita kuvien 18 ja 19 mukaisesti ja pääteltiin, mitkä pumpuista ovat äänekkäitä.

Pumppujen äänekkyiden lopputuloksissa on otettu huomioon pumppujen desibelilukemat, äänekkyystestin kokonaistulokset sekä taajuusvasteista katsotut lukemat ja arvioitu niiden perusteella jokaisen pumpun lopputulos äänekkyiden suhteen. Lopputuloksena pumpuista yhteensä kahdeksaa voidaan pitää varmasti äänekkäinä ja viittä varmasti hiljaisina, rajat läpäisevinä. Kaksi pumppua on edelleen äänekkyiden suhteen rajoilla.

Kun tarkastellaan tarkemmin testien tuloksia, huomataan, että desibelilukemien avulla saadaan jo yllättävän hyvä käsitys siitä, mitkä pumpuista ovat äänekkäitä. Kaiken kaikkiaan äänekkäiksi todettujen pumppujen joukosta seitsemän kahdeksasta pumpusta ylittää myös desibelilukemin mitattuina seitsemäksi äänekkäimmäksi pumpuksi. Ainoastaan pumppu nro 9 muodostaa poikkeuksen ollen vasta yhdenneksitoista äänekkäin pumppu desibeleinä mitattuna.

Taajuuden mukaan pumppuja lajiteltaessa kaikki neljä hiljaiseksi ja kuusi äänekkääksi katsottuna pumppua menivät lopputuloksissa samoin päin. Pumpuista viisi kappaletta merkattiin rajalla oleviksi, ja näiden kohdalla saatiin siis parempi käsitys äänekkyudesta vasta desibelimittauksien ja äänekkyystestien jälkeen.

7 Testilaitteen toimintaperiaate ja testaaminen

7.1 Testilaitteen toimintaperiaate

Edellä mainitut tavat eivät kuitenkaan kunnolla sovellu pumppujen äänekkyiden määrittelyyn. Desibelimittauksilla saadaan helposti selvitettyä kaikkein äänekkäimmät ja hiljaimmat pumput, mutta äänekkyiden suhteen rajoilla olevien pumppujen tulokset menevät osittain ristiin. Suurin ongelma on juuri äänekkyiden suhteen rajalla olevien pumppujen kanssa, koska linjalla pystytään helposti erottelemaan kuuntelemalla molempiin ääripäihin kuuluvat pumput, kun taas epäselvät pumput aiheuttavat ongelmia. Lisäksi desibelimittarin arvoja ei saada vietyä suoraan LabVIEW -ohjelmaan. Taajuustarkastelussa ei myöskään saada tarpeeksi yhteneväisiä tuloksia äänekkäiden ja rajalla olevien pumppujen välillä.

Tästä syystä kehitettiin LabVIEW:lla ohjelma, joka perustuu siihen, että hiljaisten pumppujen kohdalla pumpun ääni pysyy kohtalaisen tasaisena ja hiljaisena, jolloin lähtökoh-

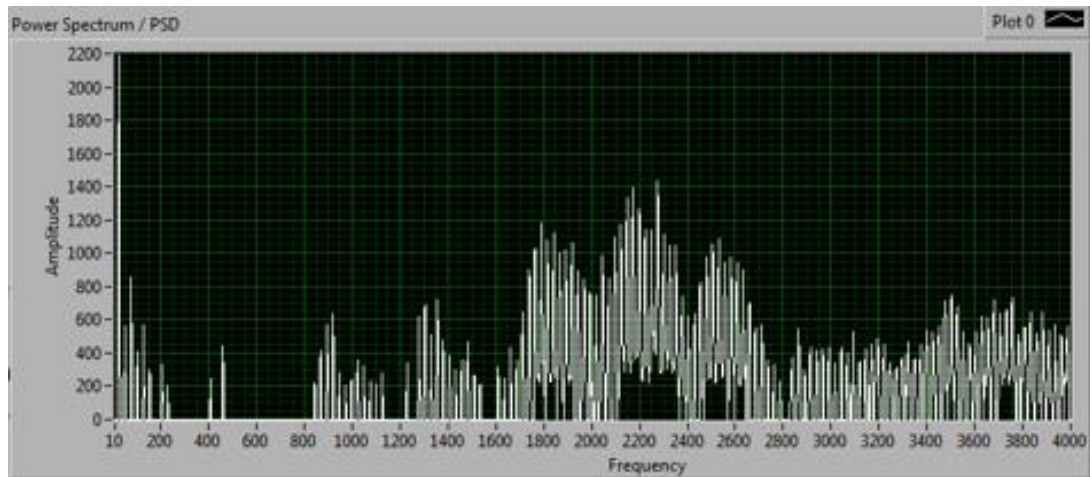
taisesti taajuuksien määrä pysyy pienenä. Äänekkäämpien pumppujen kohdalla äänenpainetaso taas on voimakkaampi ja vaihtelee enemmän, jolloin taajuuksien määrä on lähtökohtaisesti puolestaan suurempi. Ohjelmassa lasketaan yksittäiset taajuudet yhteen ja niitä verrataan testien perusteella asetettuihin rajoihin. Mitä korkeamman luke-
man taajuussumma antaa, sitä äänekkäämpi pumppu lähtökohtaisesti on ja, jos lukema ylittää rajan tällöin pumppua pidetään äänekkäänä.

Taajuuksien summaamisen lisäksi tarkastellaan kokonaissumman vaihtelua eli sitä kuinka paljon äänentaso vaihtelee – toisin sanoen sitä kuinka tasaisesti pumppu käy. Jos pumpun äänentaso vaihtelee liikaa, se kuulostaa ihmiskorvaan epämieluisalta ääneltä, jolloin pumppu pitää hylätä.

Mitattavana alueena käytetään 200 - 4000 Hz:ä, koska tällä välillä on huomattu olevan suurimmat vaihtelut äänekkäiden ja hiljaisten pumppujen välillä. Ohjelmassa poistetaan aluksi taustamelun vaikutus tuloksiin. Ohjelma mittaa vaimennuslaatikon sisälle kuuluvan melun, kun pumppu ei ole käynnissä, jolloin saadaan selville ympäröivän tilan aiheuttama taustakohina. Tämän jälkeen ohjelma nolaa tämän arvon, jolloin saadaan aikaan pohjataso. Tämän jälkeen pumppu käynnistetään ja pumpun aiheuttama spektri piirtyy pohjatason päälle. Taustamelun nollausta ei tarvitse tehdä erikseen jokaisen ker-
ran välillä, sillä se jää muistiin ohjelmaan.

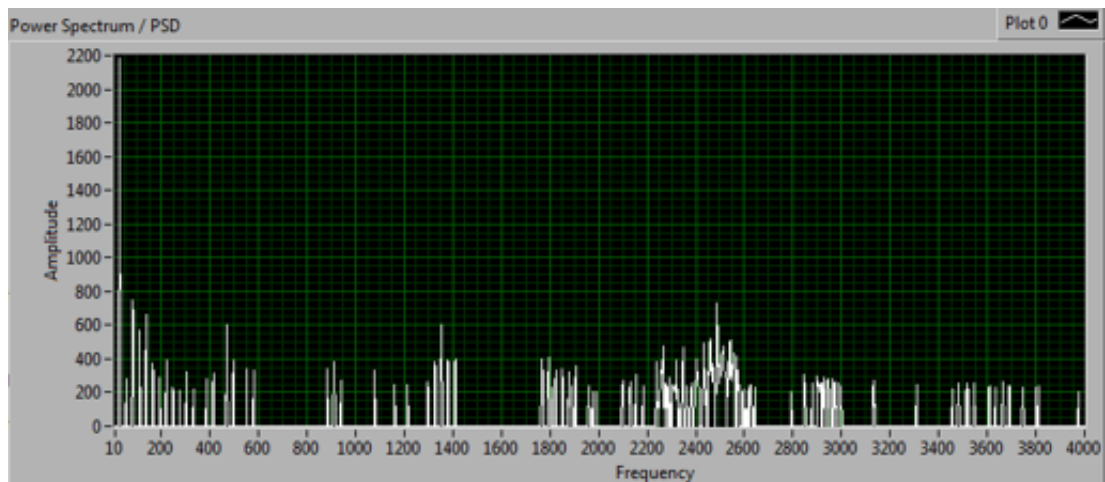
Mikrofonilta tulevalle signaalille tehdään edelleen FFT-muunnos, minkä jälkeen saadulle signaalille tehdään keskiarvoistus, jolloin saadaan suodatettua suurin vaihtelu tuloksista pois. Keskiarvoistetusta signaalista summataan kaikkien amplitudilukeman 200 ylittävien taajuuksien amplitudit yhteen, jolloin saadaan aikaan tietty lukema. Tämä lukema ei ole suoraan verrattavissa mihinkään tiettyyn desibelilukemaan. Lukema 200 tulee siitä, että tehtyjen testien perusteella jättämällä nämä alhaisimmat amplitudit pois laskuista saadaan kaikkein selvimmät erot aikaan hiljaisten ja äänekkäiden pumppujen välillä. Lisäksi pumpun ominaiskäyntitaajuus asettuu alle 200 Hz:n taajuuksille, jolloin nämä taajuudet jätetään pois tuloksista.

Testien perusteella asetettiin tietyt raja-arvot, joiden sisällä pumppujen täytyy olla päästäkseen läpi. Mitä suurempi lukema saavutetaan, sitä äänekkäämpi pumppu lähtökohtaisesti on. Kaikkein hiljaisimpien pumppujen kohdalla lukuarvo pitäisi taas olla huomattavasti pienempi. Kuvassa 21 on esimerkki äänekkäästä pumpusta, jossa taajuuksien yhteensummatu lukema on 335 000.



Kuva 21. Äänekkään pumpun taajuusvaste. Pystyakselilla on amplitudilukema ja vaaka-akselilla taajuus. Taajuuksien amplitudit lasketaan yhteen välillä 200 - 4000 Hz, aina amplitudin lukemasta 200 ylöspäin.

Kuvassa 22 nähdään taas esimerkki hiljaisen pumpun synnyttämästä spektristä. Kuvasta huomataan, että amplitudit ovat paljon matalampia kuin vastaavan äänekkään pumpun amplitudit. Kyseisen pumpun lukema on 70 000.

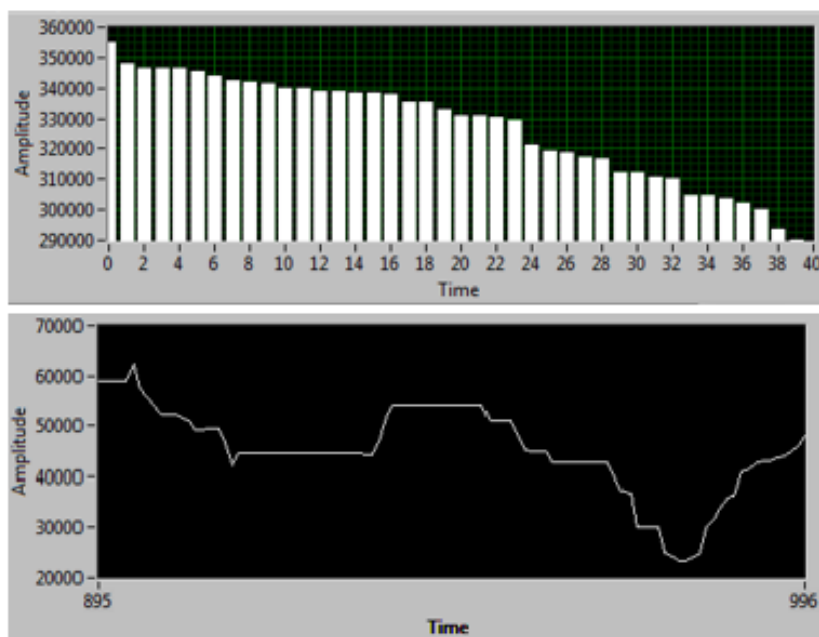


Kuva 22. Hiljaisen pumpun taajuusvaste. Pystyakselilla on amplitudilukema ja vaaka-akselilla taajuus. Taajuuksien amplitudit lasketaan yhteen välillä 200 - 4000 Hz, aina amplitudin lukemasta 200 ylöspäin.

Pumppujen äänen tasaisuus tai epätasaisuus saadaan selville, kun otetaan 40:ntä peräkkäistä mittaustulosta ja vertaillaan näiden signaalitasoja toisiinsa. Jos signaalitasot vaihtelevat paljon verrattuna toisiinsa, pumppu käy epätasaisesti. Ohjelmassa lasketaan

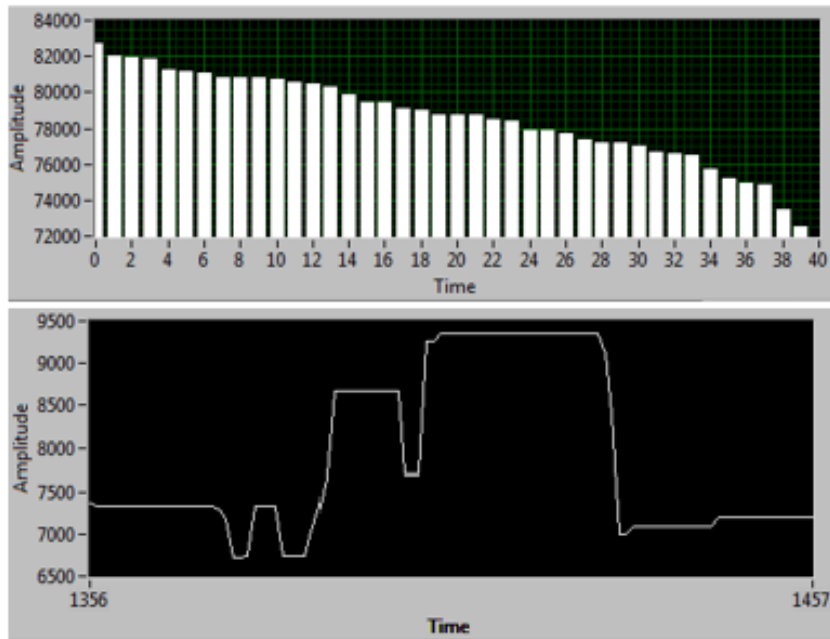
toiseksi korkeimman ja toiseksi matalimman arvon erotus, ja mitä suurempi tämä arvo on, sitä epätasaisemmin pumppu käy.

Kuvissa 23 ja 24 ylemmissä kohdissa on laitettu järjestykseen 40:nen peräkkäisen mittauksien arvot suurimmasta pienimpään, jolloin pystytään tarkastelemaan signaalien vaihtelua keskenään. Pystyakselilla on taajuuksien yhteenlaskettu summa ja vaaka-akselilla mittaukset on laitettu numerojärjestykseen välille 0 - 40:ntä. Kuvissa alemmassa kohtaa näkyvät signaalien taajuussumman keskiarvoiset vaihtelut, eli pystyakselilla näkyy senhetkinen ero toiseksi korkeimman ja toiseksi matalimman mittauksen välillä ja vaaka-akselilla näkyy aika sekunteina.



Kuva 23. Äänekkään pumpun 40:nen peräkkäisen mittauksien taajuussummat lajiteltuna suurimmasta pienimpään sekä mittauksien keskiarvoiset vaihtelut.

Kyseisellä äänekkäällä pumpulla keskimääräinen vaihtelu on 48 000, joka ylittää reilusti testien perusteella asetetun rajan. Vastaavasti hiljaisella pumpulla vastaava lukema on tässä esimerkissä ainoastaan 8 000, kuten kuvasta 24 huomataan.



Kuva 24. Hiljaisen pumpun 40:n peräkkäisen mittaustuloksen taajuussummat lajiteltuna suurimmasta pienimpään sekä mittaustulosten keskiarvoinen vaihtelu.

7.2 Testilaitteen testaaminen ja tulosten analysointi

Menetelmän toimintaa testattiin tekemällä laajempi pumpun äänekkyydesti, jossa neljä henkilöä kuunteli vuorotellen sata pumppua läpi ja merkkasi, onko pumppu hiljainen vai äänekäs. Tämän jälkeen pumput testattiin testilaitteella, jolloin otettiin ylös taajuussumma sekä keskiarvoinen vaihtelu. Testien tuloksia verrattiin toisiinsa ja analysoitiin, antaako testilaitte poikkeavia tuloksia.

Testin kokonaistulokset löytyvät liitteen 2 taulukosta. Taulukko on värikoodattu pienimmästä arvosta isoimpaan, jolloin hiljaisimmat pumput löytyvät lähtökohtaisesti vihreällä värillä ja äänekkäämmät pumput punaisella värillä. Tulokset on laitettu järjestykseen kokonaissumman ja summan vaihtelun yhteistulon mukaan. Taajuuden kokonaissumman kohdalla hylätyn pumpun raja-arvoksi asetettiin lukema 220 000 ja kokonaissumman vaihtelun kohdalla 30 000. Jos nämä arvot ylittyvät pumppu hylätään äänekkäänä. Taulukon viimeiset sarakkeet kertovat, kuinka paljon tulokset ylittivät annetut raja-arvot prosentillisesti. Tällöin nähdään helpommin kuinka suuri on ero läpäisevän ja hylätyn pumpun välillä.

Testin tuloksista huomataan, että alkupäässä pystytään selvästi näkemään yhtenäinen linja hiljaisten pumppujen kesken. Sama tilanne on myös loppupäässä, jossa huomataan, että äänekkäinä pidetyt pumpput antavat samanlaisia tuloksia keskenään, josta voidaan päätellä pumppujen olevan äänekkäitä. ”Harmaalle” alueelle sijoittuvat ristiriitaisemmat pumpput, joissa ei ole saatu sataprosenttista yhtenäisyyttä pumppujen äänekkydestä sekä muutama hiljaiseksi todettu pumppu. Tälle alueelle asettuvat myös raja-arvot, joiden perusteella pumpput hylätään.

Testeissä huomattiin, että pumppujen kanssa käytettävän vaimennuskammion siliikoniletkujen tiivydellä saattaa olla hieman vaikutuksia mittaustuloksiin, varsinkin pumppujen osalla, jotka ovat äänekkyden suhteen rajoilla. Tämä selittää osin sen, miksi tuloksissa ei saada aivan yhtenäistä linjaa näillä kohdin. Lisäksi pumpput käyttäytyvät hieman eri tavalla eri alustalla ja riippuen siitä, miten ne ovat paikoillaan. Testilaitteessa pumpput laitetaan metallilevyn päälle ja pumpput tuetaan tiivistenauhalla, koska muuten pumpput kaatuvat helposti ja testituloksista tulee toisistaan poikkeavia.

Tuloksista huomataan kuitenkin, että tällä tavalla voidaan selkeästi osoittaa että taajuussummalla ja taajuussumman vaihtelulla pystytään erottelemaan äänekkäät ja hiljaiset pumpput toisistaan. Tällä hetkellä testilaitte toimii ainoastaan linjan ulkopuolella ja se ei ole työntekijöiden yleisessä käytössä, mutta pienien säätöjen jälkeen testilaitteen on tarkoitus olla työntekijöiden yleisessä käytössä.

8 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa testilaitte, jolla pystytään erottelemaan äänekkäät ja hiljaiset pumpput toisistaan. Tätä varten työssä rakennettiin laatikko, jonka seinämät vuorattiin vaimennusmateriaaleilla, jotta saatiin vaimennettua ulkopuolelta tulevaa melua. Työnkuvaan kuului selvittää erilaisia vaimennusvaihtoehtoja ja tarkastella erilaisia sopivia vaimennusmateriaaleja. Lopputuloksena päätettiin käyttää PU-VANA 30 tuotetta, jota yritys on jo aikaisemminkin käyttänyt joissakin projekteissaan. Vaimennuslaatikon sisällä testataan pumpput ja mahdollisuuksien mukaan myös kokonaiset moduulit.

Työn aikana suoritettiin useita testauksia – niin vaimennuksen kuin pumppujen äänekkyteen liittyviä. Lisäksi testilaitetta käytettiin hyväksi jo kertaalleen hylättyjen pumppujen uudelleentestauksessa, jossa pumppujen testaus tapahtui testilaitteella. Testistä läpi

menneet tuotteet palautettiin takaisin valmistukseen ja äänekkäät pumput laitettiin syrjään tuotannosta.

Lopputuloksena saatiin kehitettyä tapa, jolla pystytään erottamaan äänekkäät pumput hiljaisista pumpuista. Tapa perustuu siihen että taajuuksien määrä äänekkäiden pumpujen kohdalla on suurempi, kuin hiljaisten pumppujen kohdalla. Lisäksi äänekkyydeltään epätasaisten pumppujen kohdalla pumppujen yhteenlaskettujen taajuuksien summa vaihtelee laajasti mittauksien välillä. Ohjelma hylkää pumpun, jos jommassa kummassa tapauksessa testien perusteella asetettu maksimiarvo ylittyy. Testilaitetta on tarkoitus käyttää seuraavaksi hyväksi toisen kaasumoduulimallin pumppujen testauksessa, jolloin tätä varten pitää määrittää omat raja-arvot näille pumpuille.

Työtä voidaan edelleen jatkaa parantelemalla pumppujen kiinnitystä testialustaan sekä muiden teknisten yksityiskohtien parantamista. Jo saatujen tulosten ja testaustavan lisäksi testausta pyritään kehittävään vielä luotettavammaksi. Suoritetuissa äänekkyysteissä ”harmaalle” alueelle sijoittuneet ristiriitaisemmat pumput, joista ei saatu sataprosenttista yhtenäisyyttä pumppujen äänekkyydestä sekä muutama hiljaiseksi todettu pumppu päätettiin lähettää pumpun valmistajalle tutkimuksiin. Pumpun valmistaja tekee omalla testerillään äänekkyytestit näille kyseisille pumpuille. Näistä saatujen tuloksien perusteella saadaan parempaa varmuutta siitä miten hyvin testeri toimii ja täytyykö sen toimintaa vielä jollakin tavalla parantaa tai kehitellä.

Lähteet

- 1 GE Suomessa. GE Healthcaren kotisivut. 2015. Verkkodokumentti. <<http://www.ge.com/fi/company/ge-en-finland>>. Luettu 9.11.2015.
- 2 Karvonen, Antti. 2010. Äänioppi 1 - Äänen synty. Verkkodokumentti. <http://www.opiskele.com/kurssit/musiikkifysiikka/html/01b_aanen_synty.shtml>. Luettu 3.9.2015.
- 3 Akustiikkaa. 2010. Verkkodokumentti. <<http://piisami.net/tieto/akutek.htm>>. Luettu 3.9.2015.
- 4 Ruippo, Matti. 2010. Desibeli, äänenvoima. Verkkodokumentti. <<http://ruippo.fi/mustek/bandikamat/page24/page24.html>>. Luettu 8.9.2015.
- 5 Ääneneristys ja -vaimennus. Verkkodokumentti. <<http://www.paroc.fi/know-how/aani>>. Luettu 3.9.2015.
- 6 Gyproc äänikirja. 1992. Helsinki: Gyproc Oy.
- 7 Vahtera, Eveliina. 2011. Raidemelun vaimennuskyky matalien melusteiden tuotevaatimuksena. Diplomityö. Verkkodokumentti. <http://www.soundim.fi/wp-content/uploads/2013/03/Diplomityo_vahtera_2011.pdf>. Luettu 18.9.2015.
- 8 Tirkkonen, Anna-Maria. 2013. Cadna A melumallinnusohjelman käyttö maa-ainesten ottoalueiden melumallinnuksessa. Opinnäytetyö. Verkkodokumentti. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/58896/Tirkkonen_Anna-Maria.pdf?sequence=1>. Luettu 18.9.2015.
- 9 Kontkanen, Olli. 2014. Ympäristömelulle altistuvien ihmisten määrän arviointitarkkuuden parantaminen. Diplomityö. Verkkodokumentti. <https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/13607/master_Kontkanen_Olli_2014.pdf?sequence=1>. Luettu 18.9.2015.
- 10 Halme, Alpo & Halme-Salo, Eija. 2003. RIL 129 Ääneneristysten toteuttaminen. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y.
- 11 Siponen, Denis. 2005. Laajakaista-absorbentti. Diplomityö. Verkkodokumentti. <http://research.spa.aalto.fi/publications/theses/siponen_mst.pdf>. Luettu 11.9.2015.
- 12 Meluton Bitumi. Tuote - esite. Verkkodokumentti. <<http://meluton.fi/tuotteet/aa-nieristeet/aaenieristeet-bitumi>>. Luettu 5.10.2015.

- 13 Levyresonaattori - Mitoitus ja teoria kaavan takana. Verkkodokumentti. <<http://kotiweb.kotiportti.fi/audiovideo/akustiikka/levyresonaattori/levyresonaattori.html>>. Luettu 10.9.2015.
- 14 Fisica, onde Musica. Verkkodokumentti. <http://fisicaondemusica.unimore.it/Risuonatori_di_Helmholtz_en.html>. Luettu 11.9.2015.
- 15 MiniDSP UMIK-1 mikrofonin tekniset tiedot. Verkkodokumentti. <<https://www.minidsp.com/images/documents/Product%20Brief%20-%20Umik.pdf>>. Luettu 6.12.2015.
- 16 Meluton PU - VANA 30 tuote - esite. Verkkodokumentti. <http://meluton.fi/uploads/documents/Meluton_kennovana.pdf>. Luettu 5.10.2015.

Äänekkyystestin 1 tulokset

Testaaja 1			Testaaja 2			Testaaja 3		
Pumppu	Hiljainen	Äänekäs	Pumppu	Hiljainen	Äänekäs	Pumppu	Hiljainen	Äänekäs
1	x		1	x		1	x	
2	x		2	x		2	x	
3		x	3		x	3		x
4	x		4	x		4	x	
5	x		5	x		5		x
6		x	6		x	6		x
7	x		7	x		7	x	
8		x	8		x	8		x
9	x		9		x	9		x
10	x		10	x		10	x	
11		x	11		x	11		x
12		x	12		x	12		x
13	x		13	x		13		x
14		x	14		x	14		x
15		x	15		x	15		x

Äänestyksen 2 kokonaistulokset

Pumppu	Äänestyksen %	Kokonaissumma	Vaihtelu	Tulo	%Fail Kokonaissumma	%Fail Vaihtelu	%Fail
68	0 %	18 000	6 000	108 000 000	0 %	0 %	0 %
54	0 %	40 000	6 000	240 000 000	0 %	0 %	0 %
94	0 %	40 000	6 000	240 000 000	0 %	0 %	0 %
51	0 %	46 000	6 500	299 000 000	0 %	0 %	0 %
18	0 %	44 000	7 000	308 000 000	0 %	0 %	0 %
96	0 %	50 000	7 000	350 000 000	0 %	0 %	0 %
56	0 %	48 000	8 000	384 000 000	0 %	0 %	0 %
82	0 %	55 000	7 000	385 000 000	0 %	0 %	0 %
17	0 %	60 000	8 000	480 000 000	0 %	0 %	0 %
88	0 %	60 000	8 000	480 000 000	0 %	0 %	0 %
85	0 %	62 000	8 000	496 000 000	0 %	0 %	0 %
66	0 %	50 000	10 000	500 000 000	0 %	0 %	0 %
55	0 %	70 000	7 500	525 000 000	0 %	0 %	0 %
75	0 %	60 000	10 000	600 000 000	0 %	0 %	0 %
77	0 %	76 000	8 000	608 000 000	0 %	0 %	0 %
4	0 %	68 000	9 000	612 000 000	0 %	0 %	0 %
65	0 %	78 000	8 000	624 000 000	0 %	0 %	0 %
40	0 %	84 000	7 500	630 000 000	0 %	0 %	0 %
79	0 %	70 000	9 000	630 000 000	0 %	0 %	0 %
20	0 %	64 000	10 000	640 000 000	0 %	0 %	0 %
41	0 %	65 000	10 000	650 000 000	0 %	0 %	0 %
34	0 %	88 000	8 000	704 000 000	0 %	0 %	0 %
9	0 %	65 000	11 000	715 000 000	0 %	0 %	0 %
31	0 %	55 000	13 000	715 000 000	0 %	0 %	0 %
42	0 %	60 000	12 000	720 000 000	0 %	0 %	0 %
49	0 %	84 000	9 000	756 000 000	0 %	0 %	0 %
12	0 %	70 000	11 000	770 000 000	0 %	0 %	0 %
43	0 %	55 000	14 000	770 000 000	0 %	0 %	0 %
36	0 %	60 000	13 000	780 000 000	0 %	0 %	0 %
23	0 %	80 000	10 000	800 000 000	0 %	0 %	0 %
44	0 %	90 000	9 000	810 000 000	0 %	0 %	0 %
32	0 %	70 000	12 000	840 000 000	0 %	0 %	0 %
39	0 %	70 000	12 000	840 000 000	0 %	0 %	0 %
11	0 %	80 000	11 000	880 000 000	0 %	0 %	0 %
27	0 %	90 000	10 000	900 000 000	0 %	0 %	0 %
3	0 %	105 000	9 000	945 000 000	0 %	0 %	0 %
98	0 %	102 000	10 000	1 020 000 000	0 %	0 %	0 %

Pumppu	Äänekkyys %	Kokonaissumma	Vaihtelu	Tulo	%Fail Kokonaissumma	%Fail Vaihtelu	%Fail
14	0 %	85 000	12 000	1 020 000 000	0 %	0 %	0 %
67	0 %	80 000	13 000	1 040 000 000	0 %	0 %	0 %
28	0 %	105 000	10 000	1 050 000 000	0 %	0 %	0 %
57	0 %	105 000	10 000	1 050 000 000	0 %	0 %	0 %
15	0 %	135 000	8 000	1 080 000 000	0 %	0 %	0 %
63	0 %	84 000	14 000	1 176 000 000	0 %	0 %	0 %
62	0 %	100 000	12 000	1 200 000 000	0 %	0 %	0 %
97	0 %	125 000	10 000	1 250 000 000	0 %	0 %	0 %
58	25 %	105 000	12 000	1 260 000 000	0 %	0 %	0 %
61	0 %	105 000	12 000	1 260 000 000	0 %	0 %	0 %
71	0 %	105 000	12 000	1 260 000 000	0 %	0 %	0 %
89	0 %	160 000	8 000	1 280 000 000	0 %	0 %	0 %
92	0 %	130 000	10 000	1 300 000 000	0 %	0 %	0 %
37	0 %	110 000	12 000	1 320 000 000	0 %	0 %	0 %
45	0 %	55 000	24 000	1 320 000 000	0 %	0 %	0 %
26	0 %	110 000	13 000	1 430 000 000	0 %	0 %	0 %
29	0 %	170 000	9 000	1 530 000 000	0 %	0 %	0 %
38	25 %	65 000	25 000	1 625 000 000	0 %	0 %	0 %
7	0 %	120 000	14 000	1 680 000 000	0 %	0 %	0 %
100	0 %	156 000	11 000	1 716 000 000	0 %	0 %	0 %
74	0 %	125 000	14 000	1 750 000 000	0 %	0 %	0 %
59	0 %	110 000	16 000	1 760 000 000	0 %	0 %	0 %
69	0 %	100 000	18 000	1 800 000 000	0 %	0 %	0 %
83	0 %	160 000	12 000	1 920 000 000	0 %	0 %	0 %
2	0 %	100 000	20 000	2 000 000 000	0 %	0 %	0 %
46	0 %	120 000	17 000	2 040 000 000	0 %	0 %	0 %
13	0 %	205 000	10 000	2 050 000 000	0 %	0 %	0 %
19	0 %	110 000	19 000	2 090 000 000	0 %	0 %	0 %
81	0 %	165 000	13 000	2 145 000 000	0 %	0 %	0 %
87	25 %	125 000	20 000	2 500 000 000	0 %	0 %	0 %
70	0 %	170 000	17 000	2 890 000 000	0 %	0 %	0 %
16	25 %	130 000	22 500	2 925 000 000	0 %	0 %	0 %
8	0 %	150 000	20 000	3 000 000 000	0 %	0 %	0 %
86	50 %	190 000	16 000	3 040 000 000	0 %	0 %	0 %
24	0 %	205 000	15 000	3 075 000 000	0 %	0 %	0 %
35	25 %	165 000	20 000	3 300 000 000	0 %	0 %	0 %
53	50 %	188 000	18 000	3 384 000 000	0 %	0 %	0 %
73	0 %	200 000	18 000	3 600 000 000	0 %	0 %	0 %

Pumppu	Äänekkyy %	Kokonaissumma	Vaihtelu	Tulo	%Fail Kokonaissumma	%Fail Vaihtelu	%Fail
91	50 %	215 000	17 000	3 655 000 000	0 %	0 %	0 %
21	0 %	195 000	20 000	3 900 000 000	0 %	0 %	0 %
25	75 %	235 000	18 000	4 230 000 000	107 %	0 %	107 %
76	50 %	235 000	22 000	5 170 000 000	107 %	0 %	107 %
48	0 %	240 000	13 000	3 120 000 000	109 %	0 %	109 %
52	50 %	260 000	14 000	3 640 000 000	118 %	0 %	118 %
5	100 %	265 000	20 000	5 300 000 000	120 %	0 %	120 %
95	100 %	270 000	30 000	8 100 000 000	123 %	0 %	123 %
22	100 %	205 000	37 000	7 585 000 000	0 %	123 %	123 %
78	100 %	215 000	37 000	7 955 000 000	0 %	123 %	123 %
93	100 %	275 000	22 000	6 050 000 000	125 %	0 %	125 %
6	75 %	210 000	40 000	8 400 000 000	0 %	133 %	133 %
64	100 %	165 000	44 000	7 260 000 000	0 %	147 %	147 %
10	100 %	180 000	45 000	8 100 000 000	0 %	150 %	150 %
84	100 %	450 000	30 000	13 500 000 000	205 %	0 %	205 %
80	100 %	520 000	16 000	8 320 000 000	236 %	0 %	236 %
33	100 %	260 000	40 000	10 400 000 000	118 %	133 %	252 %
72	100 %	380 000	33 000	12 540 000 000	173 %	110 %	283 %
90	100 %	340 000	40 000	13 600 000 000	155 %	133 %	288 %
99	100 %	360 000	40 000	14 400 000 000	164 %	133 %	297 %
30	100 %	400 000	40 000	16 000 000 000	182 %	133 %	315 %
50	100 %	350 000	50 000	17 500 000 000	159 %	167 %	326 %
1	75 %	370 000	50 000	18 500 000 000	168 %	167 %	335 %
47	100 %	390 000	50 000	19 500 000 000	177 %	167 %	344 %
60	100 %	480 000	60 000	28 800 000 000	218 %	200 %	418 %