

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA ELEKTROTEHNIKO

Tine Albreht

Analiza zvočne slike črpalke z asinhronskim motorjem

DIPLOMSKO DELO VISOKOŠOLSKEGA STROKOVNEGA ŠTUDIJA

Mentor: doc. dr. Boštjan Murovec

Ljubljana, 2006

ZAHVALA

V prvi vrsti se želim na tem mestu zahvaliti mentorju doc. dr. Boštjanu Murovcu za vso pomoč, nasvete ter pregled tega diplomskega dela. Zahvaljujem se vsem sodelavcem v podjetju Ydria Motors, d. o. o., Podskrajnik - Cerknica, ki so pripomogli k sestavi tega diplomskega dela. Hvala tudi vsem profesorjem in asistentom Fakultete za elektrotehniko in Fakultete za računalništvo in informatiko, ki ste se in se boste dalje trudili študentom razsvetliti dele neznanega horizonta.

POVZETEK

V diplomskem delu skušamo ugotoviti, ali lahko z uporabo kondenzatorskega mikrofona, zvočno izolirane komore in ustrezne programske opreme ovrednotimo zvočno sliko črpalke P12 proizvajalca Ydria Motors, d. o. o., Podskrajnik – Cerknica, ki jo poganja enofazni asinhronski elektromotor. Z zvočno analizo skušamo izločiti kakovostno sprejemljiv motor od motorja, pri katerem predpostavljamo, da je za uporabnika prehrupen, oziroma pri katerem lahko iz zvočne slike razberemo nekakovostno montažo ali nekakovostne sestavne dele. Z izločanjem predvideno slabih motorjev želimo doseči večje zadovoljstvo kupcev ter kljub višjemu izmetu na proizvodni liniji, manjše število reklamiranih proizvodov ter s tem posledično tudi manj stroškov za proizvajalca.

S pomočjo vzorca petdesetih črpalk za črpanje kondenza iz sušilnih strojev, katere poganja asinhronski električni motor moči 24 W, določimo mejne vrednosti frekvenčnega zvočnega spektra, ki naj bi še bil sprejemljiv za končnega uporabnika. S pomočjo pridobljenega znanja bi postopek v prihodnosti lahko uporabili za avtomatsko kontrolo, ki bi na podlagi zvočne slike lahko zadovoljivo razlikovala ustrezne črpalke od neustreznih.

Prvi del diplomske naloge predstavlja princip delovanja asinhronskega motorja, posebnosti posameznih izvedb ter možnosti spreminjanja motornih končnih karakteristik. V drugem delu je predstavljeno področje akustike ter pridobljeno znanje pri praktični izvedbi meritev šuma na vzorcu črpalk.

Na podlagi zvočne slike asinhronskega motorja lahko z ustrezno nastavljenimi mejnimi vrednostmi zvočnega signala in njegovega frekvenčnega spektra ločimo ustrezne črpalke od neustreznih. Domnevamo, da lahko z ustreznimi prilagoditvami ta način ločevanja uporabimo tudi za druge izdelke, ki pri svojem delovanju proizvajajo zvok, pod pogojem, da pri zaznavanju ni večjih zunanjih vplivov.

ABSTRACT

The goal of the thesis is to get insight into the capabilities and limitations of quality control and inspection of condensed-water pumps P12 of the manufacturer Ydria Motors, d. o. o., Podskrajnik – Cerknica by grabbing and analyzing their sound images. The analyse has been carried out on the P12 pumps by Ydria Motors Ltd, which are propelled by a single-phase asynchrone motor with shaded poles, supplied by the mains power supply of 230 V. The equipment for the task consists of condensator microphone, soundproof chamber and appropriate software. Our aim is to use the results of sound analysis for distinguishing motors of acceptable quality from the erratic or inferior ones with respect to their quality. Specifically, we try to recognize too noisy motors, due to poor assembly process or inadequate parts. By eliminating such expectedly bad motors we strive towards bettering customers' satisfaction as well as reduced number of reclamations.

By inspecting the sample set of fifty pumps, we empirically determined the distinguishing properties of sound spectra, according to which it is possible to classify specific pumps as good or of insufficient quality. The obtained knowledge could in the future help us to automate the quality control inspection of the pumps.

KAZALO

ZAHVALA.....	II
POVZETEK	III
ABSTRACT	IV
KAZALO	I
KAZALO TABEL	IV
KAZALO SLIK.....	V
PREGLED UPORABLJENIH SIMBOLOV	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. Asinhronski elektromotor	1
1.2. Princip delovanja asinhronskih strojev.....	3
1.3. Navor asinhronskega motorja.....	5
1.4. Slip in frekvenca rotorja	7
1.5. Zagon asinhronskih elektromotorjev	7
1.5.1. Zagon enofaznih asinhronskih motorjev	9
1.6. Spreminjanje števila vrtljajev asinhronskih motorjev.....	13
1.7. Enofazni asinhronski motor z zasenčenimi poli	14
1.7.1. Različne izvedbe asinhronskih motorjev.....	15
1.7.2. Način delovanja motorja.....	16
1.7.3. Predstavitev stresanega magnetnega polja.....	18
2. ČRPALKA P12 IN NJENI GLAVNI SESTAVNI DELI.....	19
2.1. Kontrola ustreznosti vhodnih materialov in polizdelkov	20
2.1.1. Ležajni jarem: - iz polimerov ali.....	20
2.1.2. Rotor.....	21
2.1.3. Stator in statorsko jedro	22
2.1.4. Vzbujevalno navitje	23
3. ZVOK IN ŠUM.....	24
3.1. Zvočni tlak	26
3.2. Nihanje	29
3.2.1. Splošno o nihanju.....	29
3.3. Sestavljeno nihanje	31
3.3.1. Enaki nihanji z enakima fazama.....	31
3.3.2. Enaki nihanji z nasprotnima fazama	32
3.3.3. Utripanje	32
3.4. Razstavljanje nihanj.....	33

3.4.1.	Fourierova vrsta	34
3.4.2.	Fourierova analiza	34
3.4.3.	Spekter zvena	35
3.4.4.	Šum	36
3.5.	Zvočna upornost	36
3.6.	Odboj zvočnega valovanja	37
3.7.	Lom zvočnega valovanja	37
3.8.	Stoječe valovanje	38
4.	PARAMETRI ZVOČNEGA POLJA	39
4.1.	Amplituda nihanja	39
4.2.	Hitrost nihanja	39
4.3.	Zvočna energija	40
4.4.	Zvočni tok	40
4.5.	Zvočni tlak	42
4.6.	Ohmov zakon akustike	42
4.7.	Elektro-akustična analogija	43
5.	FIZIOLOŠKE ZAKONITOSTI ZAZNAVANJA ZVOKA	44
5.1.	Slušni prag	44
5.2.	Weber-Fechnerjev zakon	45
5.3.	Jakost zvoka – decibeli	45
5.4.	Spekter moči	47
5.5.	Merjenje hrupa	48
5.6.	Preprečevanje hrupa	50
6.	ELEKTROAKUSTIKA	53
6.1.	Mehansko-električni pretvorniki – mikrofoni	53
6.2.	Kondenzatorski mikrofoni	56
7.	IZVEDBA MERITEV ZVOČNE SLIKE ČRPALKE	58
7.1.	Zakaj težnja po avtomatskem merjenju zvočnega spektra?	58
7.2.	Akustična komora	58
7.3.	Merilna oprema	60
7.4.	Glavni deli programa v okolju Labview	61
7.5.	Kalibracija mikrofona	65
7.6.	Potek merjenja	67
7.7.	Analiza neustreznih črpalk	71

8.	SKLEPNE UGOTOVITVE.....	73
9.	LITERATURA.....	74
	PRILOGE.....	77

KAZALO TABEL

Error! No table of figures entries found.

KAZALO SLIK

Error! No table of figures entries found.

PREGLED UPORABLJENIH SIMBOLOV

A	površina (m^2)
F	frekvenca (s^{-1})
λ	valovna dolžina (m)
t	čas (s)
ω	kotna hitrost (s^{-1})
c	hitrost svetlobe (m/s)
δ	zračna reža (mm)
f_R	frekvenca vrtenja rotorja (s^{-1})
f_S	frekvence vrtenja magnetnega polja (s^{-1})
n	vrtljaji (1/min)
n	harmonska komponenta
n_s	sinhronsko število vrtljajev (1/min)
s	slip
U	napetost (V)
I_s	tok statorja (A)
I_Z	zagonski tok (A)
I_N	nazivni tok (A)
P	moč (W)
M	navor (Nm)
M_Z	zagonski navor (Nm)
M_N	nazivni navor (Nm)
B	gostota magnetnega polja (T)
ϕ	magnetni pretok (Wb)

1. UVOD

1.1. Asinhronski elektromotor

Asinhronski stroji so zelo razširjeni električni rotacijski stroji [1]. Poganja jih izmenična napetost, pri čemer je hitrost vrtenja rotorja odvisna tako od frekvence napetosti kot tudi od obremenitve. Asinhronskim strojem rečemo tudi indukcijski stroji. Razlog je v tem, da se tok v rotorju inducira zaradi vrtilnega magnetnega polja. Navor deluje na rotor zaradi induciranega toka. Le ta sili rotor k vrtenju. Vrtilni magnetni pretok stroja se vrti s sinhronskim številom vrtljajev n_s glede na mirujoči stator, rotor pa z vrtljaji $n < n_s$, torej asinhronsko.

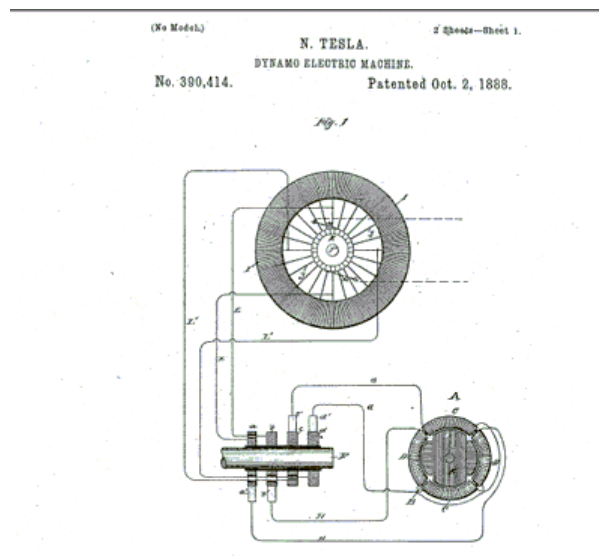
Prvi asinhronski elektromotor je leta 1888 patentiral Nikola Tesla (slika 1).



Slika 1: Prvi asinhronski elektromotor
(preslikano iz [2])

Posebnost tega elektromotorja je, da ga lahko priključimo na enofazno ali trifazno napetost. Izkorišča princip vrtilnega elektromagnetnega polja. Tesla je to polje odkril leta 1882. Stator ima na notranji strani tri ločena navitja. Rotor se nahaja na gredi in ima obliko malega cilindra z ovojem paralelnih bakrenih žic.

Slika 2 prikazuje risbo s katero je Nikola Tesla patentiral prvi asinhronski elektromotor.



Slika 2: Risba, s katero je Nikola Tesla patentiral prvi asinhronski motor
(preslikano iz [3])

Stator in rotor sta dva glavna dela asinhronskega motorja. Ko steče tok skozi navitja statorja, nastane vrtilno magnetno polje. To inducira tok v rotorskih vodnikih, zato se rotor obnaša kot elektromagnet. Sledeč vrtilnemu magnetnemu polju, se rotor giblje krožno z manjšim številom vrtljajev. Razlika v številu vrtljajev nastane zaradi mehanskih izgub (trenje pri vrtenju gredi, zračni upor).

Teslin motor je izjemno enostaven in v tem genialen. Delovanje je skoraj brezšumno, izkoristek pa je lahko tudi 95 %. To je eden najboljših motorjev, ki spreminja električno energijo v mehansko delo.

Nekatere izvedbe sodobnih asinhronskih motorjev imajo zaradi preproste izvedbe, robustne gradnje, nizkih proizvodnih stroškov in pogonske zanesljivosti, slabe izkoristke, vendar so ravno zaradi svoje cenenosti še vedno nenadomestljivi v nekaterih gospodinjskih aparatih.

1.2. Princip delovanja asinhronskih strojev

Asinhronski stroji imajo nekatere podobnosti s transformatorji [4: str. 77]. Imajo dve navitji; to sta primarno in sekundarno navitje, ki sta nameščeni v utorih statorja oziroma rotorja. Med statorjem in rotorjem je zračna reža δ , ki je tolikšna, da zagotovi neovirano gibanje rotorja. Imamo torej magnetni krog z zračno režo. Tokovi, ki tečejo skozi statorska in rotorska navitja, ustvarjajo vrtilni magnetni pretok, ki inducira napetosti tako v primarnem (statorskem) kot v sekundarnem (rotorskem) navitju. Pri transformatorju je frekvenca električnih veličin primarnega in sekundarnega navitja enaka, saj obe navitji objemata magnetni pretok enake frekvence in ne spreminjata svoje medsebojne lege. Pri asinhronskem stroju pa vrtilni magnetni pretok ne reže z enako hitrostjo palic primarnega (statorskega) in sekundarnega (rotorskega) navitja.

V primeru, ko asinhronski stroj uporabljamo kot elektromotor in ne generator, ima pri svojem normalnem obratovanju sekundarno navitje kratkosklenjeno, toda samo pri mirujočem rotorju je le to ekvivalentno kratkemu stiku transformatorja. Kakor hitro se začne rotor gibati, se joulske izgube v rotorskem navitju nižajo, raste pa mehanska moč na gredi stroja.

Aktivna dela stroja sta stator in rotor, oba z navitjem. Stator je sestavljen iz lamel dinamo pločevine in ima v utorih nameščeno eno- ali tri-fazno pasovno navitje, ki je priključeno na izvor električne napetosti.

Rotor je tudi lameliran in ima utore v katerih:

- je pasovno navitje s tremi izvodi, vezanimi na drsne obroče,
- je kratkosklenjeno navitje pri rotorju s kratkostično kletko,
- ni navitja in utorov, rotor je masiven, blizu površine tečejo vrtilni tokovi.

Bistvena razlika med trifaznim in enofaznim asinhronskim motorjem je, da enofazni motor brez pomožnega navitja ne more steči. Ko rotor nekoliko zasučemo v eno ali drugo smer, se le-ta zavrti in (v praznem teku) kmalu doseže skoraj sinhronsko hitrost. Stojee izmenično polje enofaznega statorja lahko obravnavamo kot iz dveh polovičnih vrtilnih polj sestavljeno polje. Ti polji se vrtita v nasprotnih smereh s sinhronimi vrtiljaji.

Opisani način lahko razložimo na podlagi dejstva, da je za vrtenje motorja nujno potrebno vrtilno magnetno polje. Če je motor priključen na enofazno napetost, povzroča le ta izmenični magnetni pretok, ne ustvarja pa vrtilnega magnetnega polja. Vendar lahko vsako izmenično magnetno polje razstavimo na dve enako veliki vrtilni magnetni polji, ki se vrtita v nasprotnih smereh. Pri tem je magnetni pretok dveh vrtilnih magnetnih polj enak polovični vrednosti maksimalnega izmeničnega magnetnega pretoka.

$$B_s = \frac{B_v}{2}(+n_s) + \frac{B_v}{2}(-n_s) \quad (1)$$

Oznake pomenijo:

B_s - izmenično magnetno polje,

B_v - vrtilno magnetno polje,

n_s - sinhronsko število vrtljajev vrtilnega magnetnega polja (s^{-1}) ali (min^{-1}).

Frekvenca vrtenja rotorja f_R je manjša od sinhronske frekvence (frekvence vrtenja magnetnega polja) f_s . Razliki med obema frekvencama, izraženi relativno glede na frekvenco vrtenja magnetnega polja, rečemo slip (s) (slovensko: spodrsniti, drseti).

$$s = \frac{n_{rel}}{n_s} = \frac{n_s - n}{n_s} \text{ sledi: } n_{rel} = s n_s \text{ ter } n = n_s - n_{rel} = n_s (1 - s) \quad (2)$$

Oznake pomenijo:

n – dejansko število vrtljajev rotorja (s^{-1}) ali (min^{-1}),

$n_{rel} = n_s - n$ - relativno število vrtljajev.

Imamo torej dva vala polovičnih amplitud, ki se vrtita v nasprotnih smereh ($+\omega t$, $-\omega t$). Dokler rotor miruje, vplivata nanj obe polji enako močno, zato je tudi rezultirajoči navor enak nič in na izvor napetosti priključen enofazni motor stoji. Če zdaj rotor le malo zasučemo v smeri enega izmed obeh vrtilnih polj, le to potegne rotor za seboj in stroj steče. Sedaj enofazni asinhronski stroj obravnavamo kot stroj, katerega eno polje deluje na rotor pospeševalno, drugo pa zaviralno. V odnosu na prvo polje se vrti rotor z slipom (s) v odnosu na drugo polje pa s slipom ($2-s$).

Del polja, ki se vrti v isto smer kot rotor, imenujemo direktno polje, drugi del, ki se vrti obratni smeri od vrtenja rotorja, je inverzno polje.

Enofazni asinhronski motor deluje kot motor ($0 < s < 1$) ali kot generator ($s < 0$). Zavornega področja pri tem motorju ne poznamo, saj pri pozitivnih slipih, ki so večji od 1, obe polji (direktno in inverzno) zamenjata svoji vlogi in zopet smo v motorskem oz. generatorskem področju inverznega polja pri obratni smeri vrtenja.

Trifazni asinhronski elektromotor lahko še naprej teče kot enofazni motor, če med njegovim delovanjem izpade ena od treh faz, na katere je priključen. Pri tem pade moč motorja na 60 % njegove nazivne moči. Zaradi tega je pri nazivni obremenitvi motor preobremenjen in njegova navitja se prekomerno pregrevajo. Večje preobremenitve motor ne more premagati, kar pomeni da se podobno kot enofazni motor ustavi. Ko se to zgodi, sam od sebe ne more več ponovno steči, saj je njegov zagonski vrtilni navor enak nič. V takem stanju bi navitja čez čas pregorela, kajti mirovanje motorja pod napetostjo pomeni kratek stik. Če želimo trifazni motor uporabljati kot enofazni motor, ga moramo zavarovati s termičnim zaščitnim stikalom, še posebej, če tak motor nenadzorovano teče.

1.3. Navor asinhronskega motorja

Pri elektromotornem pogonu imamo opravka z motorjem, ki s svojim navorom poskuša zavrteti gred motorja [5: str. 8]. Pri tem ga ovirajo različni vplivi: vztrajnost rotorja, trenje ter samo breme oziroma delovni stroj, ki ga motor poganja (črpalka, ventilator, tekoči trak, dvigalo, ...). Pri motorskih pogonih je karakteristika obremenitve podana s karakteristiko navora bremena M_b , v odvisnosti od števila vrtljajev, kar podaja naslednja enačba [4: stran 96]:

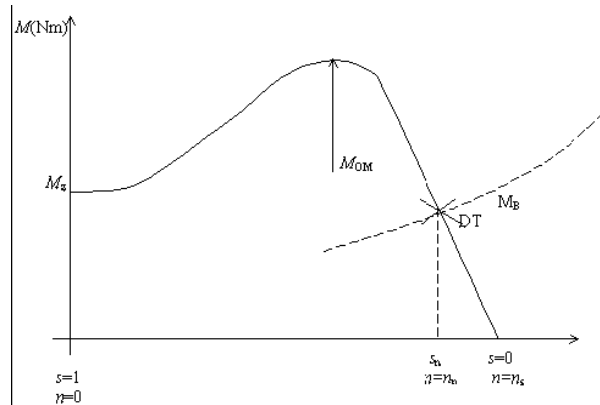
$$M_b = f(n) \quad (3)$$

Oznake pomenijo:

M_bnavor bremena (Nm) in

nštevilo vrtljajev.

Tako za dvigalo velja, da je navor bremena neodvisen od števila vrtljajev, za centrifugalno črpalko ali ventilator pa velja, da navor obremenitve narašča s številom vrtljajev. Pri problematiki elektromotornih pogonov tudi navorno karakteristiko asinhronskega motorja prikažemo v odvisnosti od števila vrtljajev ali v odvisnosti od slipa, kar je praktično isto (slika 3).



Slika 3: Navorna karakteristika asinhronskega motorja
(preslikano iz [5])

Oznake na slikah pomenijo:

M_z zagonski navor asinhronskega motorja (Nm),

M_{om} omahni navor asinhronskega motorja (Nm),

M_n nazivni navor asinhronskega motorja (Nm),

M_b navor bremena (npr. ventilator) (Nm),

s_n nazivni slip in

DT delovna točka, kjer se sekata karakteristiki navora motorja in bremena.

1.4. Slip in frekvenca rotorja

Ne glede na tip rotorja, se zaradi spremembe magnetnega polja v rotorju inducira napetost rotorja, ki po rotorski kletki požene tok. Navor, ki deluje na inducirane tokove, ima enako smer, kot je smer vrtenja magnetnega polja. To ugotovimo, če izhajamo iz Lenzovega pravila: tok se inducira v taki smeri, da zavira vzrok svojega nastanka. Sledi, da navor zavrti rotor v smeri, ki zmanjša relativno frekvenco vrtenja magnetnega polja glede na rotor. Do enakega zaključka pridemo, če iz smeri sekanja silnic najprej ugotovimo smer inducirane toka in nato smer sile na vodnik.

Očitno je smer vrtenja rotorja enaka smeri vrtenja magnetnega polja. Iz povedanega sledi, da mora biti frekvenca vrtenja rotorja manjša od frekvence vrtenja magnetnega polja. Če bi bili frekvenci enaki, bi bil pretok skozi rotor konstanten, in s tem se napetost v rotorju ne bi inducirala, zato bi bil navor na rotor enak nič...

1.5. Zagon asinhronskih elektromotorjev

Zagon motorja je proces, ki traja določen čas, da mirujoči rotor z $n = 0$ oziroma $s = 1$ doseže bremenu ustrezno število vrtljajev n oziroma slip s in statordi tok I_s , moč P in vrtilni navor M . Idealen motor bi imel [4: stran 101]:

- majhno razmerje zagonskega toka proti nazivnemu toku I_Z / I_N in
- veliko razmerje zagonskega vrtilnega navora proti nazivnemu vrtilnemu navoru M_Z / M_N .

Ob zagonu steče do osemkrat večji tok od obratovalnega toka. To ni dobro za druge porabnike v omrežju, zato je neposreden priklop preko stikal dovoljen le za motorje z nazivno močjo do 3 kW, običajno pa neposredno priključimo na omrežje le motorje do 1,1 kW. Za večje moči torej rabimo posebno napravo – zaganjač.

Zagonski tok zmanjšamo:

- s povečano upornostjo navija statorja,
- z znižanjem napetost na sponkah motorja in
- s povečanjem upornosti rotorskega navitja.

Upornost statorja povečamo z nastavljivimi predupori na priključnih sponkah (ni odvisno od vezave statorja) ali z nastavljivimi upori pri priključku statorja v zvezdo. Tak zagon se uporablja bolj redko. Uporaben je pri večjih strojih, ki jih zaganjamo neobremenjene, tako da je zagonski navor čim manjši.

Zagonsko napetost zmanjšamo na več načinov. Za manjše in srednje velike motorje povečujemo napetost v dveh korakih – najprej stator vežemo v zvezdo in ko rotor doseže enakomerno frekvenco vrtenja, stator preklopimo v trikotnik. Na začetku je torej napetost posameznega navitja statorja fazna napetost, v vezavi trikotnik pa medfazna. Seveda mora biti motor dimenzioniran na medfazno napetost. Na ta način zmanjšamo zagonski tok za trikrat. Pri večjih motorjih priklop v dveh korakih ne zadošča, zato je med omrežjem in statorjem trifazni transformator. Obstajata dve različici: z več odcepi na sekundarni tuljavi ali zvezno nastavljivi avtotransformator. Ko dosežemo končno frekvenco vrtenja, preklopimo motor neposredno na omrežje.

Povečanje upornosti rotorja je možno le pri rotorju z drsnimi obroči. Zagonski upori so večstopenjski, celotna naprava se imenuje zaganjalnik in je termično dimenzionirana za določeno št. zagonov na uro. Pri mirujočem rotorju ($n = 0$ in $s = 1$) uporabimo največjo vrednost zagonskega upora, tako da zagonski tok ne prekorači dopustne vrednosti. Kasneje se z rastočim št. vrtljajev vklaplajo nižje stopnje. Ko se približamo nazivnim vrtljajem, navadno izklopimo vse dodatne zagonske upore in kratko vežemo rotorska navitja.

1.5.1. Zagon enofaznih asinhronskih motorjev

Ker enofazni motor brez pomožne faze sam ne steče, moramo rotor premakniti, da v smeri premika vrteča se komponenta magnetnega polja oz. rezultirajoči vrtilni navor M rotor pospeši. Ta premik izvajamo s pomočjo pomožnega navitja, ki je v času zagona vezano paralelno z glavnim navitjem.

Drugače je, če na rotor delujemo z zunanjim navorom. Sile na palice še vedno delujejo pravokotno na smer polja, vsota vseh navorov pa je različna od nič. Kratkostična kletka se vrti v smeri, v kateri je deloval zunanji navor.

1.5.1.1. Glavne izvedbe enofaznih asinhronskih motorjev glede na vrsto zagona

Glavne izvedbe enofaznih asinhronskih motorjev se glede na vrsto zagona razlikujejo po načinu vzbujanja vrtilnega magnetnega polja, po posebnih zahtevah in lastnostih, ki naj jih ima motor, ali po kombinacijah asinhronskega navora v istem motorju. Vsi ti motorji imajo praviloma na rotorju kratkostično kletko.

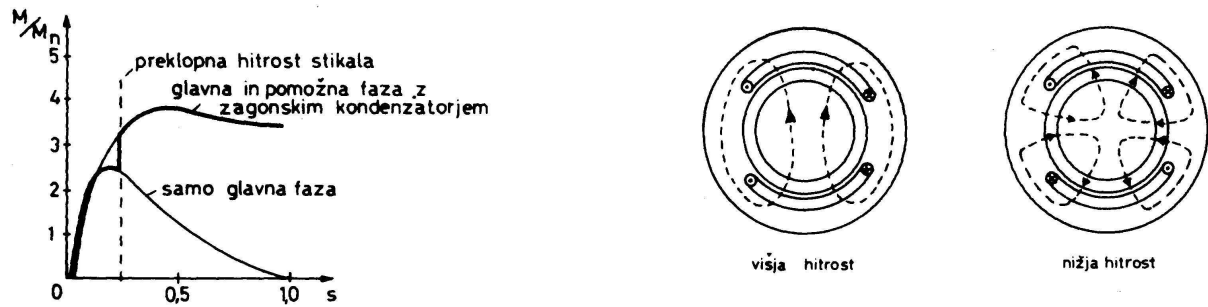
1.5.1.1.1. Asinhronski motor s pomožno fazo

To je zelo razširjen motor za moči med 35 W in 280 W. Ta enofazni motor ima na statorju glavno fazno navitje in pomožno fazno navitje. Pomožno fazno navitje je vklopljeno samo med zagonom, da se motor zavrti, nato ga odklopimo. Za odklop je uporabljeno centrifugalno stikalo, ali tokovni rele, ki konstrukcijsko ni tako zahteven. Zelo pogosto so taki motorji grajeni za dve hitrosti vrtenja.

Kadar imamo opraviti z zelo različnimi hitrostmi, so ti motorji opremljeni s posebnim glavnim in pomožnim navitjem za vsako hitrost vrtenja. Tipičen primer so motorji za pralne stroje, kjer so hitrosti v razmerju 1:6 do 1:8.

Ko želimo hitrosti v razmerju 1:2, uporabimo polno preklopljiva navitja. Vsako fazno navitje je razdeljeno v dva dela. Pri zaporedni vezavi teh dveh delov dobimo manjše št. polov in višjo hitrost. Ko preklopimo en del navitja v proti stik z drugim, dobimo dvojno število polovih parov in polovično hitrost.

Slika 4 prikazuje navorno karakteristiko asinhronskega motorja ter magnetnega polja pri različnem številu polov pri višji in nižji hitrosti.



Slika 4: Navorna karakteristika asinhronskih motorjev (levo) in magnetno polje pri različnem številu polov pri višji in nižji hitrosti (desno).
(preslikano iz [6])

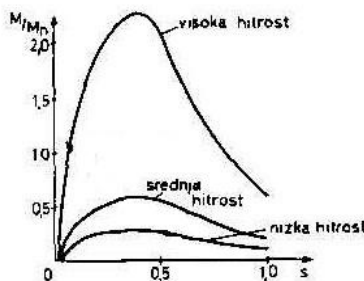
1.5.1.1.2. Asinhronski motor s kondenzatorjem v pomožni fazi

Značilnost teh strojev je, da jim zaporedno z navitjem pomožne faze vežemo ustrezen kondenzator, s čimer poskrbimo za potrebni fazni premik med tokovima glavnega in pomožnega faznega navitja, ki ga potrebujemo za vzbujanje vrtilnega magnetnega polja.

Nekaj najpogostejših vezav teh kondenzatorskih motorjev:

- enofazni asinhronski motor s trajnim kondenzatorjem v pomožni fazi

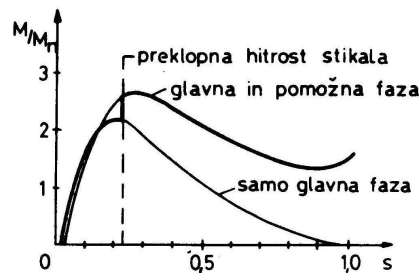
Slaba stran tega motorja je razmeroma majhen zagonski navor (slika 5). To zahteva skrbno prilagoditev kondenzatorja in bremena.



Slika 5: Navorna karakteristika enofaznega asinhronskega motorja s trajnim kondenzatorjem v pomožni fazi
(preslikano iz [6])

- enofazni asinhronski motor z zagonskim kondenzatorjem

Pomožno fazno navitje s kondenzatorjem je priključeno samo med zagonom. Centrifugalno stikalo odklopi pomožno navitje, ko doseže motor približno 80 % sinhronske hitrosti in motor teče dalje kot čisti enofazni motor z enim navitjem. Če ostane pomožna faza vklopljena, naraste napetost na kondenzatorju na preveliko vrednost, s čimer se prekomerno poveča tok pomožne faze in motor lahko pregori. Navorno karakteristiko enofaznega asinhronskega motorja prikazuje spodnja slika 6.



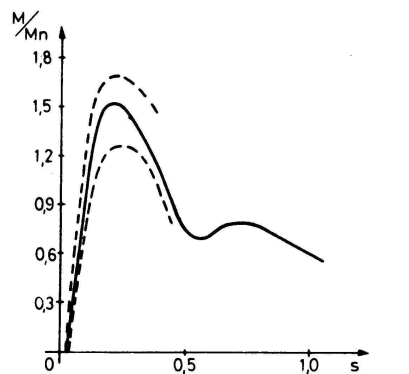
Slika 6: Navorna karakteristika enofaznega asinhronskega motorja z zagonskim kondenzatorjem
(preslikano iz [6])

- enofazni asinhronski motor z dvojnimi kondenzatorjem

V serijo s pomožnim navitjem ima vključena dva kondenzatorja. Med zagonom sta priključena oba in s skupno kapacitivnostjo poskrbita za močan zagonski navor. Pri približno 80% sinhronske hitrosti centrifugalno stikalo odklopi en kondenzator. Drugi kondenzator ostane priključen in motor deluje dalje kot s stalnim kondenzatorjem. V primerjavi z motorjem s kondenzatorjem v zagonski fazi ima ta motor boljši izkoristek manjši hrup in večji zagonski navor.

1.5.1.1.3. Asinhronski motor z zasenčenimi poli

Asinhronski motorji z zasenčenimi poli so najcenejše izvedbe asinhronskih motorjev in so primerni le za moči nekaj deset W. Imajo izražene pole, pri katerem je en del pola ovit s kratkostičnim obročem. Časovni potek magnetnega pretoka na nezasenčenem delu sledi spreminjanju električnega toka skozi stator, na zasenčenem delu pa zaradi vrtničnih tokov v obroču magnetni pretok fazno zaostaja. Izmenično magnetno polje zato svoj maksimum doseže najprej med nezasenčenim delom, nato pa se premakne v smeri zasenčenega dela. Ustvari se torej (sicer popačeno) krožeče magnetno polje, ki zavrti rotor v smeri od nezasenčenega proti zasenčenemu delu pola. Motor ima nekoliko slabše lastnosti kot motor s stalnim kondenzatorjem v pomožni fazi, ker prilagoditev obratovalnemu stanju in zagonu ni tako dobra. Primeren je samo za zagone z majhno obremenitvijo, saj mu zasenčeni poli sicer zagotavljajo stalno smer vrtenja, njihovo delovanje pa ni tolikšno, da bi lahko motor razvijal večji zagonski navor. Navorno karakteristiko asinhronskega motorja z zasenčenimi poli prikazuje slika 7. Polno izrisana krivulja prikazuje nazivni potek karakteristike, medtem ko so črtkano označene meje, znotraj katerih najdemo posamezen motor pri serijski proizvodnji.



Slika 7: Navorna karakteristika asinhronskega motorja z zasenčenimi poli.
(preslikano iz [6])

Zaradi kratkostičnega ovoja (ali dveh ovojev) na posameznih polih ima takšen motor precejšnje segrevanje v normalnem obratovanju oziroma zelo nizek izkoristek (do 20 %).

1.6. Spreminjanje števila vrtljajev asinhronskih motorjev

Asinhronski motor, ki je priključen na omrežje toge napetosti, minimalno spremeni število vrtljajev od prostega teka do nazivne obremenitve (za nekaj procentov). Število vrtljajev rotorja lahko spreminjamo [4: stran 114]:

- s spremembo frekvenca napajalne napetosti,
- s spremembo števila polovih parov oziroma polov,
- s spremembo slipa.

Spreminjanje števila vrtljajev motorja s spreminjanjem frekvenca napajalne napetosti

Iz enačbe za napetost (4) sledi, da se mora napajalna napetost spreminjati linearno s frekvenco. V tem primeru je $U / f = U_x / f_x = k\phi = \text{konst.}$, tako ostane magnetni pretok praktično enak in motor polno izkoriščen [4: stran 114].

$$U = k f \phi \quad (4)$$

Oznake v enačbi:

Unapajalna napetost,

ffrekvenca in

ϕmagnetni pretok.

Vsak asinhronski motor, ki je grajen za omrežje 50 Hz, lahko obratuje tudi na omrežju 60 Hz, če je napetost ustrezno višja in obratno. Praktično je lahko moč stroja na 60 Hz omrežju še nekoliko večja zaradi boljše ventilacije stroja pri višjih vrtljajih.

Spreminjanje števila vrtljajev motorja s spreminjanjem števila polov

- stator ima več navitij z različnimi polovimi koraki in s tem različno št. polov. Aktivno je tisto navitje, ki ustreza dani hitrosti vrtenja, pri čemer ostala navitja niso priključena,
- če je sprememba hitrosti vrtenja in s tem sprememba št. polov v razmerju 2:1 se uporablja vezava Dahlander [4: str. 116]. Celotno navitje je pri obeh hitrostih priključeno na napetost in tako polno izkoriščeno. Potrebno pa je posebno stikalo za prevezavo statorskih trifaznih navitij, tako da dobimo vrtilne pretoke ustreznega št. polov.

Spreminjanje števila vrtljajev motorja s spreminjanjem slipa

To je mogoče pri rotorjih z drsnimi obroči. Slip spreminjamo tako, da spreminjamo moč v rotorskem krogu. To dosežemo na dva načina [4: stran 117]:

- s povečanjem upornosti v rotorskem tokokrogu - vežemo krmilne upore, ki so termično dimenzionirani za daljše obratovanje kot zagonski upori,
- s spreminjanjem moči v rotorju. Le to dosežemo s priključitvijo rotorskega tokokroga v pomožno sekundarno omrežje. Ta primer ustreza kaskadi dveh asinhronskih motorjev z drsnimi obroči, katerih rotorja imata skupno gred. Rotor enega motorja napaja stator drugega motorja. Rotorju odvzeta moč ne gre v izgubo ampak v mehansko delo.

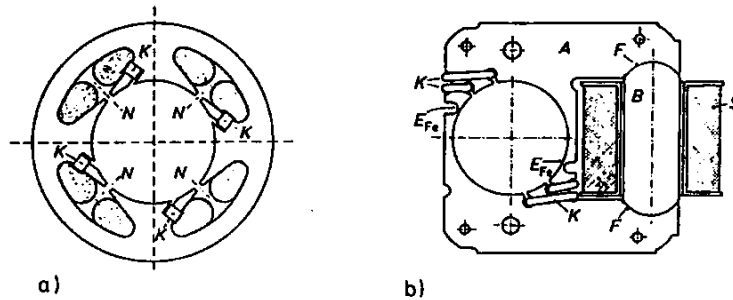
1.7. Enofazni asinhronski motor z zasenčenimi poli

Motorje z zasenčenimi poli uporabljamo za pogon majhnih ventilatorjev ali črpalk torej predvsem za zagone pri manjših obremenitvah. Grajeni so za moči od nekaj W do nekaj deset W. Po načinu gradnje so ti motorji zelo enostavni. Robustna gradnja, nizki proizvodni stroški in pogonska zanesljivost so glavni razlogi, zakaj so kljub slabemu izkoristku nenadomestljivi v gospodinjskih aparatih.

1.7.1. Različne izvedbe asinhronskih motorjev

Motor z zasenčenimi poli sestavljajo naslednji bistveni deli (slika 8):

- vzbujevalno navitje,
- pomožno ali kratkostično navitje in
- simetrični kratkostični rotor.



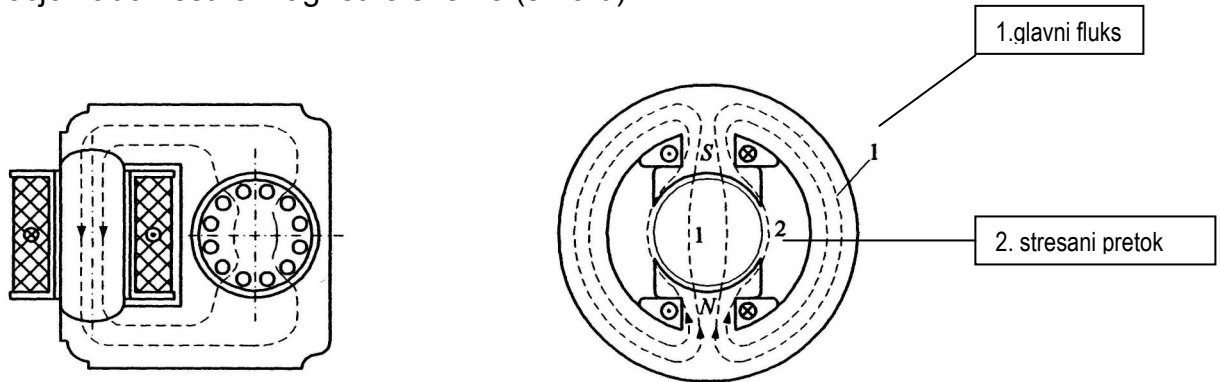
Slika 8: Vzbujevalno navitje je pri simetrični izvedbi nameščeno v dveh utorih statorja (levo) ali pri nesimetrični izvedbi ločeno na posebnem jedrovem listu, kot pri transformatorju (desno)
(preslikano iz [7])

Slika 8 (desno) prikazuje primer, ko je vzbujevalna tuljava izdelana posebej in vtisnjena skupaj z jedrovim listom B v jaremski del A. Pri tem nastane med jedrovim listom in jarmom dodatna zračna reža ali zareza, označena na sliki s črko F. Ta zareza bistveno poveča upornost magnetnega kroga nesimetrične izvedbe motorja in vpliva na nihanje kakovosti pri serijski proizvodnji. Slika 8 (levo) nam prikazuje simetrično izvedbo, pri kateri imamo med poli odprtine, označene s črko N, saj moramo skozi njih na pole namestiti vzbujevalno navitje. Pri nesimetrični izvedbi te odprtine odpadejo in imamo iz konstrukcijskih razlogov pole povezane med seboj s tako imenovanimi polovimi mostiči. Ti imajo običajno eno ali dve zarezi (žleba; oznaka z E_{Fe}). Na tem mestu pride do močnega nasičenja polja in s tem do višjih harmonikov toka.

Da ima motor zagonski navor, potrebuje pomožno navitje. Kratkostično navitje, označeno s K, je iz enega ali dveh kratkostičnih ovojev bakra in se razprostira čez del posameznega pola, s čimer je magnetno polje pod tem delom pola oslABLJENO in istočasno fazno premaknjeno (zaostajanje) glede na polje pod ostalim delom pola. S faznim premikom nastane eliptično vrtilno polje, ki ima za posledico relativno majhen zagonski navor.

1.7.2. Način delovanja motorja

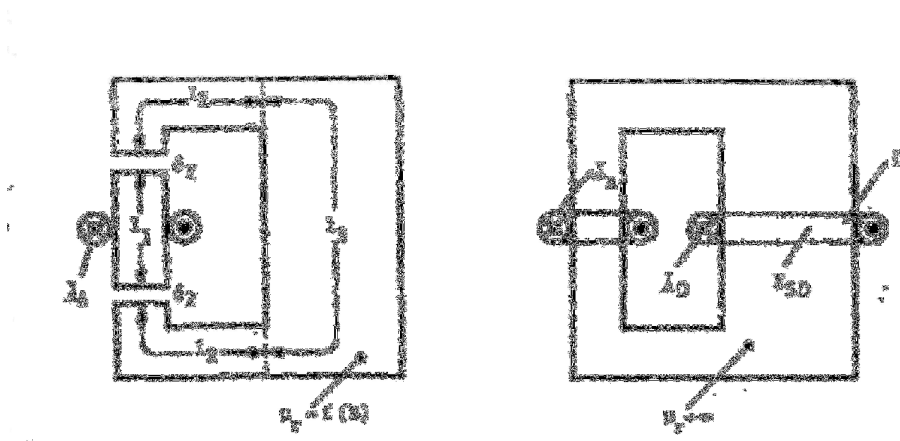
Način delovanja motorja je možno razložiti na več načinov. Eden od teh je prikaz s pomočjo nadomestne magnetne sheme (slika 9).



Slika 9: Nesimetrični rotacijski stroj (levo) in dvopolni stroj z izraženimi poli (desno);
črtkano sta označena glavni in stresani magnetni pretok
(preslikano iz [4])

Predstavitev magnetnega kroga brez upoštevanja stresanja.

Če zanemarimo stresanje imamo v celotnem krogu enak magnetni pretok. Vpliv zareze na magnetno upornost je sledeč.



Slika 10: Idealni magnetni krog (brez stresanih magnetnih polj). Stator z enojnim navitjem (levo) ter v izvedbi z dvojnim navitjem (desno)
(preslikano iz [7])

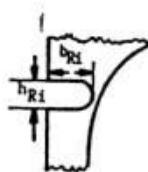
Na sliki 10 (desno), ki predstavlja idealni magnetni krog, imamo razen vzbujevalnega navitja A dodatno tuljavo D, ki je brez električne upornosti in ima le induktivno upornost. To je idealni transformator, katerega sekundarna tuljava D ima le induktivno upornost X_{SD} , odvisno od glavnega polja. Primarno navitje s tokom I_A ustvari v tuljavi D z železnim jedrom magnetni pretok Φ' . Ta inducira v navitju D napetost. Pri kratkosklenjeneni tuljavi D požene napetost v njej tok, ki je omejen s stresano reaktanco X_{SD} . Zato teče v tuljavi D pri majhni reaktanci X_{SD} velik tok I_D , ki povzroči magnetni pretok Φ'' . Ta nasprotuje magnetnemu pretoku Φ' . Ker je tuljava D brez upornosti, ni faznega premika med Φ' in Φ'' . Celoten magnetni pretok Φ nam tako tvori razliko magnetnih pretokov Φ' in Φ'' , ki sta nasprotno usmerjena. Pri majhni stresani reaktanci X_{SD} bo Φ'' velik in zato je celoten Φ majhen. To je ekvivalentno veliki magnetni upornosti celotnega magnetnega kroga oziroma visokemu nasičenju ali veliki zarezi.

Magnetna povezava glavnega navitja s kletko rotorja je možna:

- preko zračne reže,
- preko stresanih magnetnih pretokov dveh magnetnih mostičev ob reži, oziroma preko paralelnih magnetnih poti.

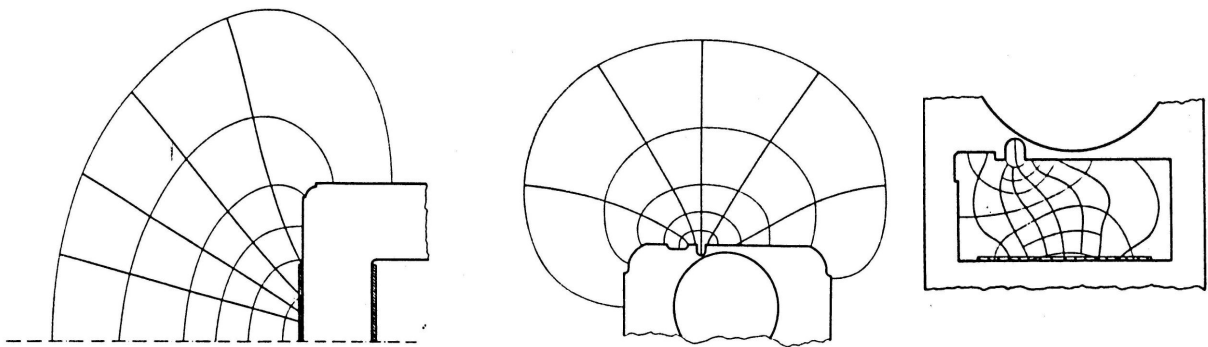
Žleb v magnetnem mostiču med poli

Del glavnega magnetnega pretoka gre preko železnih mostičev med poli. Ta del magnetnega pretoka je povezovalni magnetni pretok. Mostiča sta potrebna zaradi mehanske stabilnosti motorja in morata biti ustrezno dimenzionirana, da stresanje ni preveliko. Pri zagonu nam tako preoblikovani magnetni pretok izboljša zagonske lastnosti. Njegova velikost ne sme biti prevelika, ker potem preveč oslabimo del glavnega polja, ki gre v rotor. Ta del magnetnega pretoka uravnavamo z zarezi (žlebi). Primer mostiča vidimo na sliki 11.



Slika 11: Žleb v magnetnem mostiču
(preslikano iz [7])

1.7.3. Predstavitev stresanega magnetnega polja



Slika 12: Ekvipotencialne ploskve in silnice stresanega magnetnega polja
(preslikano iz [7]:str.18)

Stresani pretok, katerega silnice lahko vidimo na sliki 12, je nekoristen, saj deluje kot dodatna dušilka v tokokrogu. Pri motorju z zasenčenimi poli povezuje del stresanega pretoka glavno in pomožno navitje in s tem povečuje zagonski navor. Za rezultirajoče polje je merodajen material grajenega stroja in geometrijska oblika magnetnega polja. Za glavni pretok so to preseki in dolžine železnih poti in zračne reže. Pri stresanem pretoku so to predvsem poti in preseki po zraku. Pri nesimetrični gradnji je zunanji pretok pretežno stresani pretok, ki z rotorjem sploh ni sklenjen. Ta del pretoka je zelo velik, zato tudi ni velike razlike med tokom v kratkem stiku in praznem teku.

V magnetnem polju se pojavljajo občutne prostorske višje harmonske komponente, ki jih povzročajo razcepljeni izraženi poli pri majhni zračni reži. Zato imajo ti motorji relativno veliko zračno režo ($\delta = 0,3 \text{ mm}, \dots 0,6 \text{ mm}$). Dodatno je možna tudi stopničasta reža na nezasenčenem delu pola, ki je običajno dvakrat večja od reže pod ostalim delom pola. S tem izboljšamo osnovno porazdelitev polja in zmanjšamo tretji harmonik, kar zmanjša sedlo v navorni krivulji. Pri nesimetričnem motorju ne vpliva stopničasta reža samo na polje zračne reže ampak tudi na stresani pretok preko magnetnega mostiča med poli.

Te višje harmonske komponente še dodatno poslabšajo lastnosti motorja, zlasti navorno karakteristiko. Te pojave nekoliko popravimo z magnetnimi mostovi med poli, ki jih imajo danes praktično vsi stroji z zasenčenimi poli. Nekoliko dražji način je uporaba drugega ali celo tretjega kratkostičnega obroča, ki zajema ves manjši del zasenčenega pola.

2. ČRPALKA P12 IN NJENI GLAVNI SESTAVNI DELI

Črpalka P12 se izdeluje za enega večjih kupcev podjetja Ydria Motors. Kupec jo vgrajuje v sušilne stroje za izčrpavanje kondenza, zato črpalka poleg asinhronskega motorja ter črpalnega dela vsebuje še plastičen plavač z Reed stikalom [8], ki zagotavlja nenehno regulacijo nivoja kondenza v sušilnem stroju.

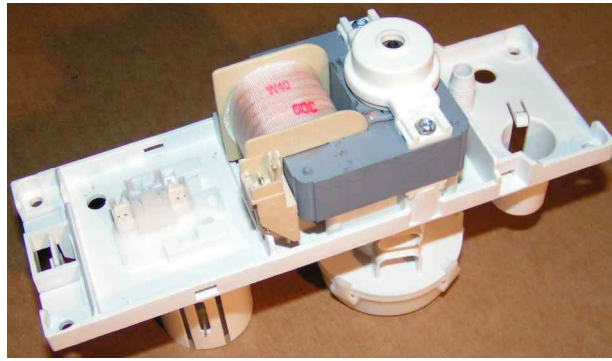
Njena električne karakteristike so:

napetost preizkušanja:	230 V,
frekvenca:	50 Hz,
tok prostega teka min.:	200 mA,
tok prostega teka max.:	230 mA,
moč pri prostem teku min.:	17.5 W,
moč pri prostem teku max.:	20.5 W,
št.vrt.prostega teka min.:	2760 1/min,
št.vrt.prostega teka max.:	2960 1/min,
upornost el. navitja:	110 Ω .

Črpalko se sestavlja na polavtomatski liniji, na kateri delajo štirje ljudje, sama linija pa vsebuje 7 delavnih postaj (slikovni material najdete v prilogi):

- delovna postaja 1: vstavljanje rotorja s podložkama, avtomatsko oljenje podložk, vstavljanje ležajnega jarma na zadnjo stran rotorja, statorja na paleto ter vstavljanje ležajnega jarma na zgornjo stran rotorja,
- delovna postaja 2: avtomatsko natiskavanje razpršilne podložke,
- delovna postaja 3: nameščanje ohišja črpalke,
- delovna postaja 4: vstavljanje pokrova črpalke in tekača,
- delovna postaja 5: vstavljanje plavača in Reed stikala,
- delovna postaja 6: 100% kontrola črpalke,
- delovno mesto 7: pakiranje črpalke.

Na sliki 13 lahko vidimo sestavljeno črpalko P12.



Slika 13: Črpalka P12

2.1. Kontrola ustreznosti vhodnih materialov in polizdelkov

Na samem vходу v proizvodni proces se kontrolira ustreznost vhodnih materialov in vhodnih sestavnih delov. Pregled vhodnih materialov se izvaja na podlagi izkušenj. Pri tem se razdeli polizdelke v glavne skupine glede na vrsto materiala in njegovo funkcijsko namembnost. S tem se lahko za različne polizdelke oblikuje podobne merilne postopke oz. se na podlagi izkušenj oceni vzorec pregledanih polizdelkov.

Glavne skupine so kar sestavni deli elektromotorja.

- 2.1.1. Ležajni jarem:** - iz polimerov ali
- iz zlitine aluminija in silicija (siluminij)

Ležajni jarem ima funkcijo centriranja rotorja glede na statorsko luknjo. Pritrjen je direktno na statorski paket z vijaki ali kovicami. Funkcija centriranja rotorja narekuje kontrolo centričnosti ležajnega mesta glede na fiksne čepe, ravnosti naležne ravnine, dimenzijo pritrdilnih čepov in višino kalote (del ležajnega jarma v katerem je sinter ležaj, mazivo ter vzmetna podložka).

Ležajni jarem, ki ga prikazuje slika 14, se uporablja za črpalko P12 in je izdelan iz polimerov ter ima funkcijo centriranja rotorja glede na statorsko luknjo. Z vijaki je pritrjen direktno na statorski paket. Zračna reža med rotorskim paketom in statorsko luknjo mora biti čimbolj enakomerna.

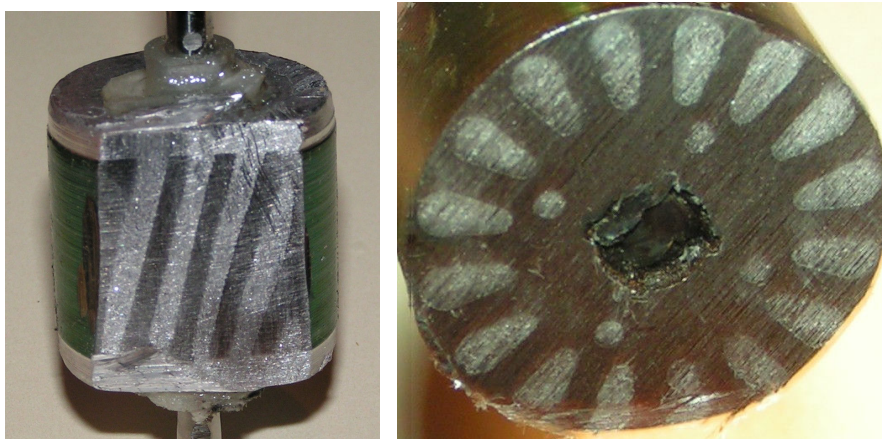


Slika 14: Ležajni jarem

2.1.2. Rotor

Rotor enofaznega motorja je enako grajen kot rotor trifaznega asinhronskega motorja. Večinoma se uporabljajo rotorji s kratkostično kletko in okroglimi palicami ter rotorji z dvojno kratkostično kletko, medtem ko so rotorji z drsnimi obroči zelo redki.

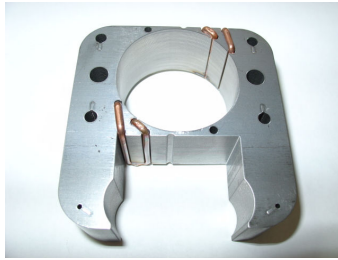
Za črpalko P12 uporabljamo pogostejšo izvedbo rotorja s kratkostično kletko. Rotor ima v utorih palice, ki so na obeh straneh povezane z dvema obročema. Palice so poševno zamaknjene za eno rotorsko, utorsko delitev, saj tako omilimo težave višjih harmonskih komponent magnetnega polja v zračni reži, ki so posledica utorskih odprtin. V tako zamaknjenih poševnih palicah se, od višjih harmonskih komponent inducirane napetosti izničujejo. Palice in obroča morata biti iz istega materiala (Al, Cu); v našem primeru uporabljamo aluminij.



Slika 15: Prikaz kratkostične kletke rotorja

2.1.3. Stator in statorsko jedro

Stator je stabilni del elektromotorja in je pričvrščen na podlago. Sestavljen je iz statorskega paketa (več lamel, povezanih med seboj). Statorska lamela je izrezana iz dinamo pločevine, katera je običajno obojestransko lakirana s posebnim izolacijskim lakom, slika 16.



Slika 16: Statorski paket

Sama oblika lamele daje motorju zaželeno karakteristiko – sposobnost magnetenja. Za prehod magnetnih tokov je lamela oblikovana tako, da ima dve zožitvi v nasprotni smeri (180°) – mostiček. Ima tudi luknji za tako imenovane kratkostične obročke, katera sta v nasprotni strani, zamaknjena za določen kot napram mostičku. Kratkostična obročka sta iz Cu žice debelejšega premera (od 2 mm do 3 mm).

Statorsko jedro je sestavljeno iz istega materiala kakor statorska lamela, vendar drugačne oblike – slika 17. Pri dvopolnih elektromotorjih se na jedro namesti vzbujačno navitje (tuljavo).

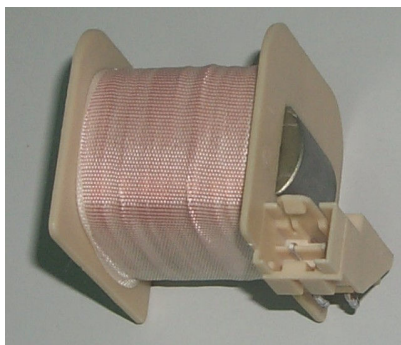


Slika 17: Statorsko jedro

2.1.4. Vzbujevalno navitje

Tuljava je navitje bakrene izolirane žice z določenim številom ovojev na izolacijskem tuljavniku. Za žico uporabljamo elektrolitsko čisti baker, čistoče najmanj 99,7 %. Debelina žice je od 0,01 mm do 1 mm. Končna namembnost posameznega elektromotorja pogojuje izbiro materiala za ohišje tuljavnika in končno dodelavo.

Na sliki 18 vidimo tuljavo P12, katere navitje je dodatno zaščiteno z zaščitnim trakom, za navitje pa se uporablja bakreno žico debeline 0,021 mm.



Slika 18: Vzbujevalno navitje - tuljava

3. ZVOK IN ŠUM

V življenju se neprestano srečujemo s takšnimi in drugačnimi zvoki. Mnogo od njih je neprijetnih in motečih, zato takemu zvočnemu valovanju rečemo tudi šum. Šum je relativen pojem, saj je odvisen tako od frekvenčnega spektra, kakor tudi od njegove glasnosti. Kot primer lahko navedemo, da je predvajana glasba za nekatere ljudi prijetna, za druge pa ne. Za nadležen zvok ni potrebno, da je glasen, nadležno je lahko že škripanje vrat ali pokanje parketa. Za nas je pomembno dejstvo, da človeško oho ni inštrument in da se z njim ne da določiti, kdaj lahko nek zvok označimo za šum in kdaj ne, saj je človeško zaznavanje zelo odvisno od osebe do osebe in njenega počutja.

Zvočno valovanje lahko tudi ruši, uničuje, razbije steklo, poškoduje omet, še največjo škodo pa povzroči kadar uniči občutljiv mehanizem za njegovo zaznavanje: človeško uho.

Zvok je definiran kot kakršnakoli sprememba zračnega pritiska, ki jo človeško oho lahko zazna in obsega območje od najtišjega zvoka do glasnosti, ki lahko poškodujejo oho.

Veda o zvoku se imenuje akustika [9] in pokriva zvočne izvore, zvočne medije in zvočno zaznavanje.

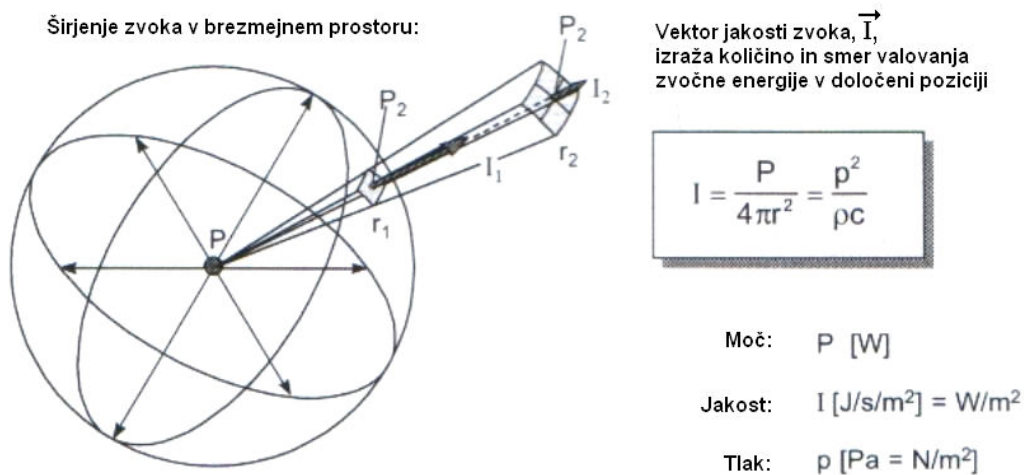
Hrup je neizogiben del našega vsakdana, tehnološki razvoj pa ima velike zasluge, da je hrupa v našem okolju vedno več (delavni stroji, tovarne, promet itd.) Zaradi vedno pogostejšega in glasnejšega hrupa vedno večjo pozornost namenjamo korakom za zmanjšanje hrupnosti v našem okolju, saj hrup ni dejavnik s katerim bi se morali sprijazniti. Da bi preprečevali oz. odpravljali hrup v našem okolju, je le tega potrebno ustrezno ovrednotiti oz. pravilno izmeriti.

Preden začnemo meriti hrup je pomembno, da smo seznanjeni z terminologijo in osnovnimi principi zvočnega merjenja. Z zvočnim virom prenesemo energijo na zračne delce oz. molekule, katere zanihajo ter v obliki valovanja prenašajo energijo kot zvočno valovanje na sosednje delce.

Jakost zvoka je fizikalna veličina, določena kot gostota energijskega toka zvočnega valovanja. Mednarodni sistem enot predpisuje za jakost zvoka izpeljano enoto W/m^2 .

Tlak ali **pritisk** (oznaka p) je kot fizikalna količina razmerje med velikostjo ploskovno porazdeljene sile F in površino ploskve S , na katero ta sila prijema.

Prikaz in izračun jakosti prikazuje slika 19.



Slika 19: Prikaz in izračun jakosti
(preslikano iz [9])

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c} \quad (5)$$

Oznake v enačbi:

Ijakost [W/m²],

Pmoč [W],

roddaljenost od izvora [m],

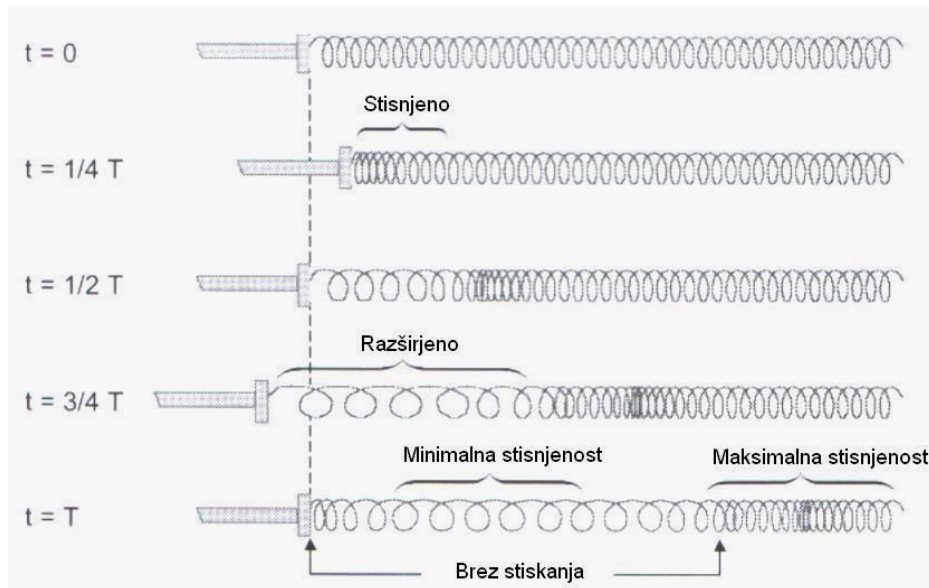
ρgostota zraka [kg/m³] ter

chitrost zvoka [m/s].

Glasnost zvoka je vektorska veličina, ki vsebuje velikost in smer. Zvočna glasnost in zvočni tlak se lahko neposredno izmerita z ustreznimi merilniki, zvočna moč pa se izračuna iz izmerjene zvočne glasnosti, pritiska ter s podatkom o ploščini in oddaljenosti, na kateri je bila meritev narejena [21].

Podatek o zvočni moči se uporablja predvsem za določanje zvočne glasnosti izvora, medtem ko podatek o jakosti uporabljamo za določanje njegove lokacije in oddaljenosti. Kadar zvočni izvori povzročajo poškodbe in škodo, je predvsem pomembna velikost zvočnega pritiska.

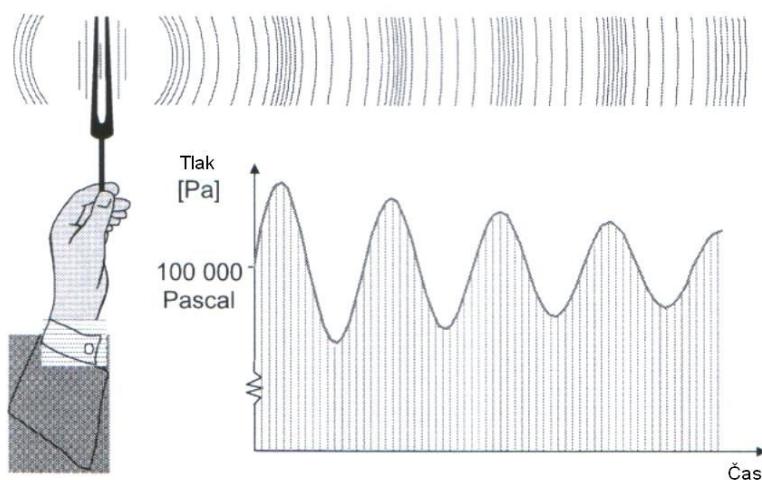
Valovanje zvoka lahko ponazorimo z vzmetjo, saj kadar vzmet stisnemo, lahko opazujemo, kako valovanje potuje po vzmeti. Enako se zgodi z molekulami zraka, kadar se stiskajo oz raztegujejo – slika 20.



Slika 20: Grafična ponazoritev valovanja zvoka
(preslikano iz [9])

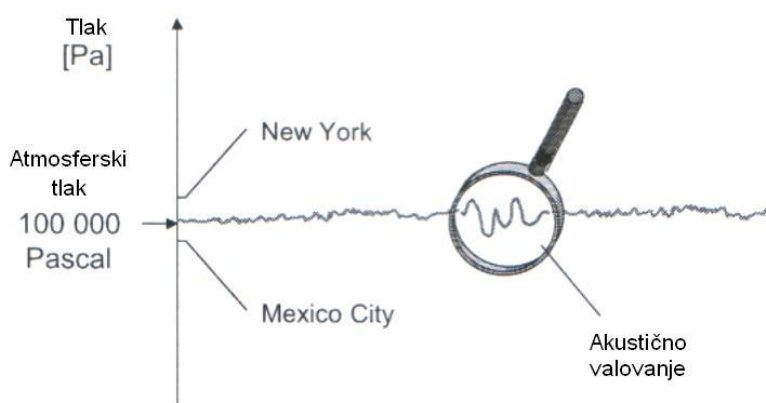
3.1. Zvočni tlak

Z uporabo zvočnih vilic, ki jih uporabljajo glasbeniki za uglasjevanje inštrumentov in oddajajo točno določeno frekvenco (ponavadi je to 440 Hz – v glasbi ton A), lahko ponazorimo delovanje zvočnega tlaka – slika 21. S pomočjo vilic in njihovega mehanskega valovanja z določeno frekvenco zanihamo molekule zraka, te pa to nihanje prenesejo na sosednje molekule in tako se spremembe zračnega tlaka prenesejo naprej po prostoru.



Slika 21: Glasbene vilice oddajajo zvok frekvence 440 Hz
(preslikano iz [9])

Spremembo zvočnega tlaka se lahko zazna tudi kot spremembo atmosferskega pritiska. Atmosferski tlak je definiran kot tlak 100 000 Pa (10^5 Pa) na morski gladini; slika 22.



Slika 22: Spremembo zvočnega tlaka se zazna kot spremembo
atmosferskega pritiska
(preslikano iz [9])

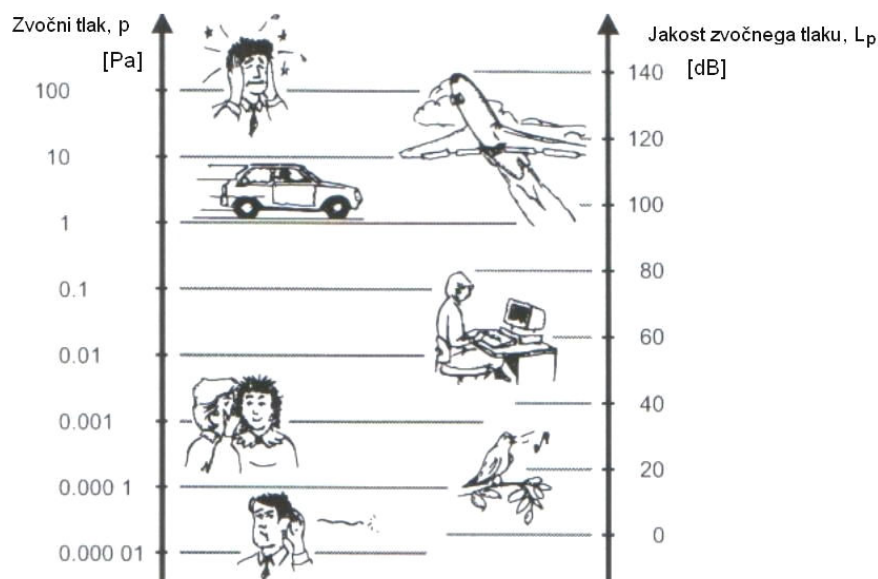
Da bi si lažje predstavljali spremembo tlaka, ki jo človeško uho lahko zazna in sega od praga slišnosti $20 \mu\text{Pa}$ pa do praga bolečine 100 Pa ter zaradi dejstva, da človeško uho zaznava te spremembe logaritmično in ne linearno, si je mnogo lažje predstavljati spremembo tlaka v logaritemski skali s pomočjo decibelov [dB].

Za računanje glasnosti v dB za osnovo vzamemo spremembo tlaka, ki jo človeško uho lahko še zazna:

$$p_0 = 20 \mu\text{Pa}$$

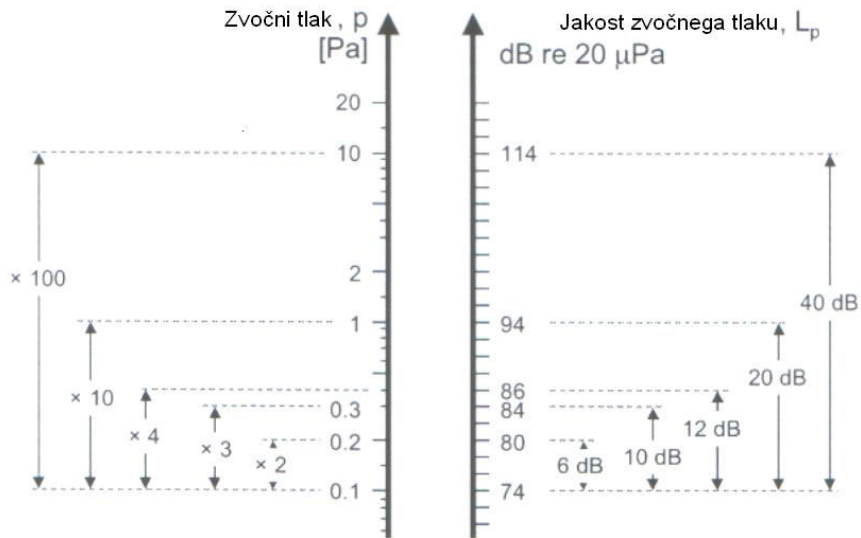
Primerjavo spremembe zvočnega tlaka, izraženega pascalih in decibelih, prikazuje slika 23. Simbol za zvočni pritisk označujemo z L_p (pressure level) in ga izračunamo po naslednji enačbi:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad (6)$$



Slika 23: Primerjava spremembe zvočnega tlaku, izraženega v pascalih ter decibelih (preslikano iz [9])

Kadar se ukvarjamo z meritvami zvoka, je zelo uporabno poznati njegove zakonitosti, njegove veličine in razmerja med linearnimi vrednostmi ter decibeli, kar prikazuje slika 24.



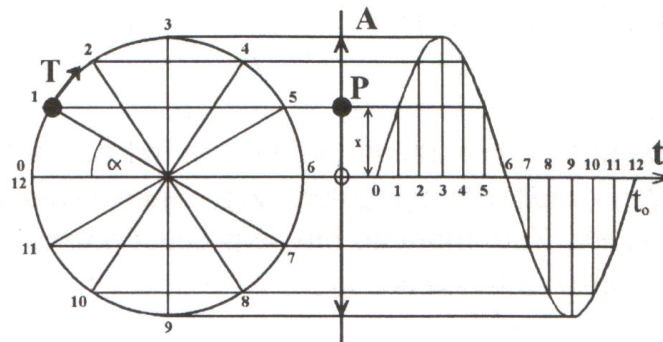
Slika 24: Razmerje med tlakom v pascalih ter decibelih še na logaritemski skali (preslikano iz [9])

3.2. Nihanje

3.2.1. Splošno o nihanju

V naravi je moč zaslediti nešteto pojavov, ki se neprestano ponavljajo in jim je zaradi tega pripisan značaj periodičnosti [10: str. 3]. Ponavljanje je lahko počasnejše ali hitrejše. Nihanje je periodično gibanje, ki je tesno povezano s kroženjem. Matematično obliko nihanja lahko izpeljemo prav iz kroženja.

Na sliki 25 vidimo točko T , ki kroži v smeri urinega kazalca po narisanim krogu.



Slika 25: Prikaz kroženja točke T v časovnem prostoru (preslikano iz [10])

Zaporedoma se pomika preko obodnih točk 1, 2, 3, do 12. Če opazujemo točko T z leve strani, v sami risalni ravnini, kroga sploh ne opazimo. Točka T se giblje kot njena projekcija vzdolž premera kroga. Osvetlimo z leve strani gibajočo točko na krogu in opazujemo njeno senco. To je projekcija P , ki se giblje okrog središčne lege navzgor in navzdol. Označimo polmer kroga z A , oddaljenost projekcije P od središčne lege z x in kot, ki ga oklepa polmer A z začetnim polmerom, z α . Velja naslednja povezava:

$$x = A \sin \alpha \quad (7)$$

Kot α se s časom spreminja, zato označimo z ω kotno hitrost kroženja točke T . Ta je enaka kvocientu kota α in časa t , ki ga točka T porabi, da se za tak kot premakne. Ker izražamo kot α v radianih, sledi

$$\omega = \alpha / t \text{ oziroma } \alpha = \omega t \quad (8)$$

iz česar sledi osnovna enačba nihanja

$$x = A \sin \omega t \quad (9)$$

Na sliki 25 vidimo, da predstavlja časovni potek nihanja sinusna krivulja. Njen največji odmik od središčne lege A imenujemo **amplituda**, trenutni odmik x pa **elongacija** nihanja. Izraz (9) pove, kakšne so razsežnosti nihanja, hitrosti nihanja, pa si lahko izračunamo z opazovanjem časa enega nihaja t_0 , to je s časom enega obkroženja točke T . Preprost premislek pove, da je število nihajev (obkroženj točke T) obratno sorazmerno času t_0 . Število nihajev v času 1 s imenujemo **frekvenca** nihanja in jo označujemo s črko f . Frekvenca f je povezana z nihajnim časom t_0 preko izraza

$$f = 1/t_0 \quad (10)$$

Enota za opisovanje frekvence je 1 Hz (1 Hertz) ter pomeni 1 nihaj v 1 s. Ker je obratno sorazmerna nihajnemu času, bo takšna tudi njena fizikalna razsežnost:

$$1\text{ Hz} = [1\text{ s}^{-1}]$$

V izrazu za nihanje (9) ne izraža hitrosti nihanja frekvenca f ampak kotna hitrost ω . Zato želimo ugotoviti še, kakšna je povezava med obema. V času enega obkroženja t_0 opiše polmer A polni kot 2π radianov (360°). Enačba (8) dobi za ta primer obliko

$$2\pi = \omega t_0$$

Ker je $t_0 = 1/f$ sledi

$$\omega = 2\pi f \quad (11)$$

Kotni hitrosti ω pravimo tudi krožna frekvenca. Dobimo jo tako, da pomnožimo frekvenco f z 2π . V praksi se mnogokrat zamenjuje navadno in krožno frekvenco in uporablja za obe isti izraz - frekvenca. Zato moramo biti še posebej pozorni na zapis in se prepričati, ali gre za frekvenco f , ali za krožno frekvenco ω .

3.3. Sestavljeno nihanje

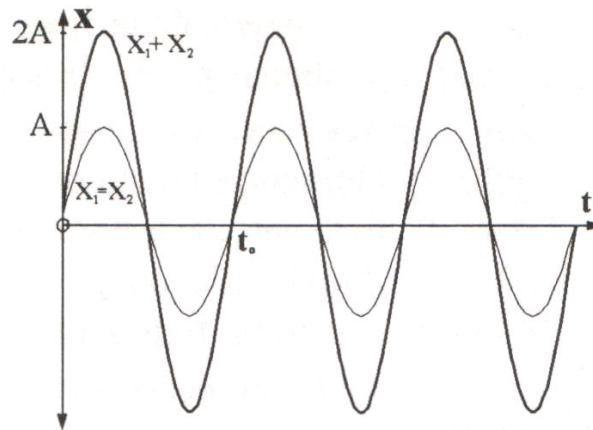
Kadar sovпада več nihanj, govorimo o njihovi **superpoziciji** [10: str. 5]. Kot rezultat dobimo sicer eno samo rezultatno nihanje, ki pa ima lahko na prvi pogled zelo zapleteno obliko in je videti neizrazljivo s sinusno funkcijo. K sreči ta vtis vara in lahko tudi bolj zapletene oblike nihanj izrazimo z več sinusnimi funkcijami. Najprej pa si oglejmo nekaj preprostejših primerov sestavljanja dveh nihanj.

3.3.1. Enaki nihanji z enakima fazama

Seštejmo dve enaki nihanji $x_1 = x_2 = A \sin \omega t$. Sledi

$$x_1 + x_2 = A \sin \omega t + A \sin \omega t = 2 A \sin \omega t \quad (12)$$

Po pričakovanju se dve enaki nihanji seštejeta tako, da ohranita svoji frekvenci, podvoji pa se prvotna amplituda. Grafično ponazoritev tega primera vidimo na sliki 26.



Slika 26: Enaki nihanji ter njuna vsota
(preslikano iz [10])

3.3.2. Enaki nihanji z nasprotnima fazama

Prvo nihanje ima obliko $x_1 = A \sin \omega t$, drugo pa je fazno premaknjeno za polovico nihaja, torej za π . Zato moramo argument sinusne funkcije za to vrednost povečati (ali zmanjšati). Tako dobi drugo nihanje obliko $x_2 = A \sin(\omega t + \pi)$. Iz osnov trigonometrije vemo, da je

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

in sledi

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

Dve enaki nihanji, a z nasprotnima fazama, se potemtakem medsebojno uničita.

3.3.3. Utripanje

V naslednjem primeru seštejemo dve nihanji z enakima amplitudama A , a malo različnima krožnima frekvencama ω_1 in ω_2 . Vsota obeh sinusnih nihanj ima obliko

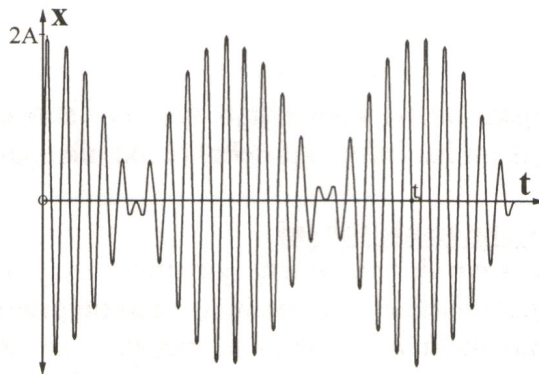
$$x_1 + x_2 = A \sin \omega_1 t + A \sin \omega_2 t$$

S pomočjo izraza za vsoto dveh sinusnih funkcij dobimo rezultat:

$$x_1 + x_2 = 2A \sin((\omega_1 + \omega_2)t/2) \cos((\omega_1 - \omega_2)t/2) \quad (14)$$

To nihanje je očitno sestavljeno iz enega sinusnega in enega cosinusnega nihanja. Frekvenca sinusnega člena je $(\omega_1 + \omega_2)/2$ in je enaka srednji vrednosti prvotnih frekvenc ω_1 in ω_2 . Frekvenca cosinusnega člena je $(\omega_1 - \omega_2)/2$, kar je polovica razlike obeh prvotnih frekvenc ω_1 in ω_2 . Ker se frekvenci le malo razlikujeta, je njuna razlika majhna in nizka je tudi frekvenca cosinusnega člena. Močno pa se spreminja amplituda in sicer od svoje največje vrednosti $2A$ pa vse do najmanjše vrednosti 0. Takšno spreminjanje amplitude imenujemo **utripanje**. Slika 27 pove, da ustrezata času enega nihaja dva utripa! Resnična frekvenca utripanja je potemtakem enaka dvakratniku frekvence $(\omega_1 - \omega_2)/2$, iz česar sledi

$$\omega_u = \omega_1 - \omega_2 \text{ oziroma } f_u = f_1 - f_2 \quad (15)$$



Slika 27: Nam prikazuje, da ustrezata času enega utripa dva nihaja
(preslikano iz [10])

3.4. Razstavljanje nihanj

V prejšnjem odstavku smo omenili, da nam daje superpozicija dveh nihanj novo periodično nihanje. V posebnih primerih je rezultanta obeh nihanj lahko preprosta, najpogosteje pa so nihanja znatno bolj zapletena. To velja še bolj, če superponiramo več osnovnih nihanj hkrati. Take primere obravnavamo s posebno matematično metodo, ki jo je odkril in objavil francoski matematik Fourier.

3.4.1. Fourierova vrsta

Fourier je ugotovil, da lahko izrazimo vsako periodično nihanje z neskončno vrsto sinusnih nihanj, katerih krožne frekvence ω_n so izrazljive s celimi mnogokratniki osnovne, to je najnižje frekvence ω . Vrsto s takimi lastnostmi imenujemo **Fourierova vrsta** in ima poenostavljeno obliko

$$x = A_1 \sin(\omega t) + A_2 \sin(2\omega t) + A_3 \sin(3\omega t) + \dots + A_n \sin(n\omega t) + \dots \quad (16)$$

Frekvence $\omega, 2\omega, 3\omega, 4\omega \dots$ so **harmonske frekvence**. Izvirna Fourierova vrsta ima poleg členov s funkcijo sinus tudi člene s funkcijo cosinus. Slednje lahko v večini primerov odpravimo, če izberemo kot začetek tisto točko periodične funkcije, v kateri je njena vrednost nič [10: str. 7].

Pri analizi zvoka so pomembne vrednosti amplitud $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ ki praviloma padajo in postanejo od nekega določenega člena dalje zanemarljivo majhne. Tako lahko teoretično neskončno vrsto v praksi obravnavamo kot končno vrsto z določenim številom členov. Število uporabljenih členov določata zgolj točnost, s katero želimo izraziti amplitude, in hitrost padanja (**konvergenca**) teh amplitud.

3.4.2. Fourierova analiza

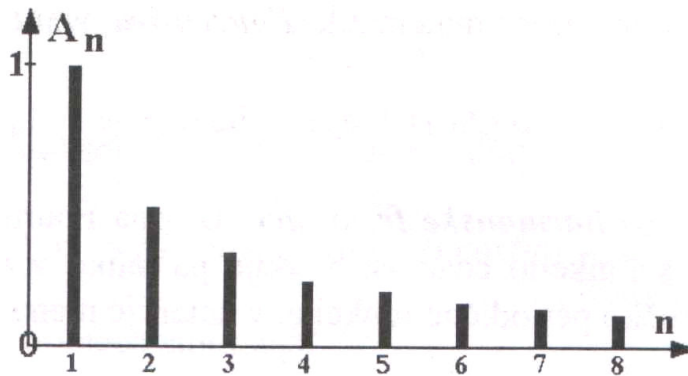
S tem ko izrazimo poljubno periodično nihanje z njegovo Fourierovo vrsto, napravimo takoimenovano **Fourierovo analizo** [10: str. 7]. Enako upravičeno jo smemo imenovati tudi **harmonska analiza**. S sredstvi višje matematike je moč izračunati Fourierovo vrsto za vsako periodično nihanje, na katerega lahko naletimo v praksi. Pravzaprav se izračun v akustiki omeji le na računanje amplitud $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$, ki so znane kot **Fourierovi koeficienti**.

3.4.3. Spekter zvena

Iz same oblike periodičnega nihanja težko razberemo harmonske člene, ki to nihanje sestavljajo. Šele z ustrezno Fourierovo vrsto lahko preprosto grafično ponazorimo deleže posameznih harmonskih amplitud A_n . Zato uporabljamo v ta namen preglednejšo grafično ponazoritev amplitud A_n posameznih harmonskih nihanj, katero imenujemo **spekter nihanja**, **harmonski spekter** ali **zvenski spekter**. Spekter pove, katere harmonske frekvence so prisotne v danem periodičnem nihanju in kolikšne so njihove relativne amplitude. Ko govorimo o relativnih amplitudah, imamo v mislih amplitudo osnovnega nihanja A_1 z vrednostjo 1, vse ostale amplitude $A_2, A_3, \dots, A_n$ pa izražene z deleži (ali odstotki) osnovne amplitude. V kolikor je npr. relativna vrednost n -te amplitude podana z izrazom $A_n = 1/n$, velja za ustrezne amplitude

$$A_1 = 1, A_2 = 1/2, A_3 = 1/3, A_4 = 1/4, A_5 = 1/5, A_6 = 1/6 \text{ itd.}$$

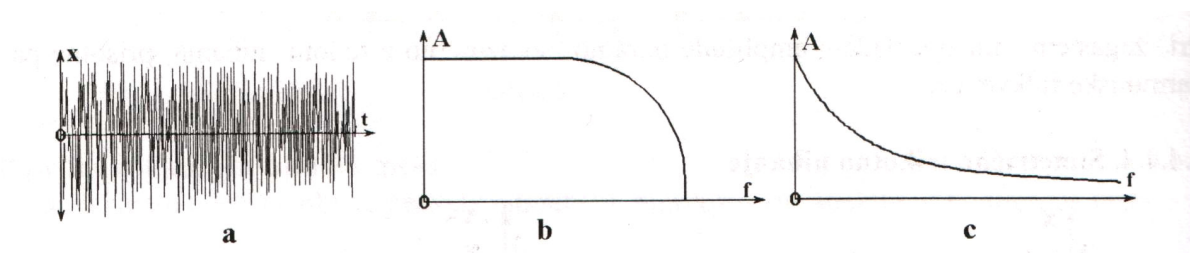
Zgornjim vrednostim ustrezeni spekter vidimo na sliki 28. Takšen spekter imenujemo tudi **amplitudni spekter**, za razliko od spektra moči, katerega bomo spoznali kasneje. Na abscisno os nanašamo lahko frekvence, krožne frekvence ali preprosto mnogokratnike n osnovne frekvence.



Slika 28: Amplitudni spekter
(preslikano iz [10])

3.4.4. Šum

Množica različnih frekvenc, iz katere nobena močnejše ne izstopa, je **šum**. Zato je ustrezna oblika nihanja nepravilna, ni periodična in jo je nemogoče izraziti s Fourierovo vrsto. Frekvenčni spekter je zvezen. To pomeni, da so v določenem frekvenčnem intervalu prisotne vse frekvence (slika 29a). Kadar se šum enakomerno razteza preko celotnega slišnega področja, mu pravimo tudi **beli šum**. Enako kot je bela svetloba sestavljena iz zveznega spektra vseh vidnih barv, je tudi slišni šum sestavljen iz vseh frekvenc v slišnem frekvenčnem področju. Med posebne oblike šuma sodi tudi takoimenovani **rožnati šum** [11]. Značilno zanj je, da so amplitude večje pri nizkih frekvencah (rožnata barva) in padajo obratno sorazmerno s frekvenco. Na sliki 29 vidimo pod **b** zvezni spekter belega šuma, pod **c** pa rožnatega šuma.



Slika 29: Beli šum (a), zvezni spekter belega šuma (b),
zvezni spekter rožnatega šuma (c)
(preslikano iz [10])

3.5. Zvočna upornost

Različne snovi vplivajo na zvok in njegovo širjenje zelo različno. Raziskave so pokazale, da sta za hitrost zvoka najbolj pomembna snovna parametra gostota snovi ρ in hitrost zvoka c . Njun produkt predstavlja **zvočno upornost** tudi **akustično upornost**, ki jo označujemo z Z .

$$Z = \rho c \quad (17)$$

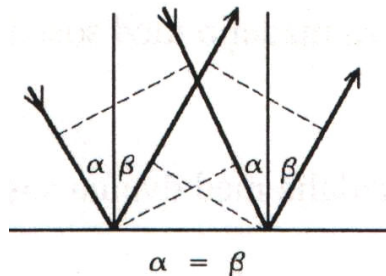
Pri natančnejšem obravnavanju zvočne upornosti je treba upoštevati tudi fazne razlike. Tedaj imenujemo zvočno upornost ***zvočna impedanca*** ali ***akustična impedanca***. V tem primeru jo izražamo v kompleksni obliki, čemur se bomo v tem delu izognili. Razsežnost zvočne upornosti je $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in je poimenovana po teoretiku na področju akustike lordu Rayleigh-u. Enota za zvočno upornost je

$$1 \text{ rayl} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \quad (18)$$

Vrednost zvočne upornosti zraka je $1,29 \text{ kg m}^{-3} \times 333 \text{ m s}^{-1} = 430 \text{ raylov}$.

3.6. Odboj zvočnega valovanja

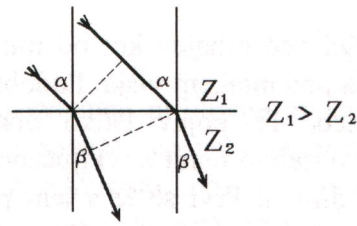
Kadar vpade zvočno valovanje na mejo dveh različnih snovi, se del valovanja na njej odbije, del pa lomi in nadaljuje pot v drugi snovi. Enako kot za svetlobo, velja tudi za zvočno valovanje, da je vpadni kot α enak odbojnemu kotu β . Lahko tudi rečemo, da se val odbija pod enakim kotom, kot vpada. Če vpade zvok pravokotno na ploskev, se bo od nje tudi pravokotno odbil. Primer odboja zvočnega valovanja kaže slika 30.



Slika 30: odboj zvočnega valovanja
(preslikano iz [10])

3.7. Lom zvočnega valovanja

Tisti del valovanja, ki preide iz prve snovi v drugo, ne nadaljuje poti v isti smeri, ampak jo bolj ali manj spremeni. Pravimo, da se valovanje pri prehodu lomi. Lomi se lahko k vpadni pravokotnici ali pa stran od nje. Primer loma k vpadni pravokotnici vidimo na sliki 31.



Slika 31: lom zvočnega valovanja
(preslikano iz [10])

Za lom valovanja velja lomni zakon, ki določa razmerje vpadnega in lomnega kota:

$$\sin \alpha / \sin \beta = Z_1 / Z_2 \quad (19)$$

Lomni kot je odvisen predvsem od zvočnih upornosti Z obeh snovi. V primeru na sliki 31 je zvočna upornost zgornje snovi Z_1 večja od upornosti spodnje snovi Z_2 . Zato je tudi vpadni kot α večji od lomnega kota β .

3.8. Stojee valovanje

Stojee valovanje je poseben primer sovpadanja dveh valovanj, ki je znano tudi pod imenom **interferenca**. Sestavljanje dveh ali več nihanj je torej superpozicija, sestavljanje več valovanj pa interferenca. Stojee valovanje povzročita dve enaki valovanji, ki se širita v nasprotnih smereh, eno proti drugemu. Rezultat interference dobimo najlažje računsko. Valovanji, ki se širita v nasprotnih smereh, zapišemo v že znanih oblikah

$$y_1 = A \sin(\omega t - kx) \text{ in } y_2 = A \sin(\omega t + kx)$$

S pomočjo izraza za vsoto dveh sinusnih funkcij izračunamo vsoto $y_1 + y_2$.

$$y_1 + y_2 = 2A \sin(\omega t) \cos(kx) \quad (20)$$

4. PARAMETRI ZVOČNEGA POLJA

4.1. Amplituda nihanja

Zvok je mehansko nihanje molekul zraka, ki se v obliki valovanja širi po prostoru. To valovanje ni omejeno samo na zrak, saj se zvok lahko širi tudi v drugih snoveh, toda v primeru, ki ga bomo obravnavali v tej diplomski nalogi se zvok širi zgolj po zraku. Dokler molekule zraka mirujejo, zvoka ni. Šele ko pričnejo nihati z določeno frekvenco in amplitudo okrog svojih mirovnih leg, uho lahko zazna zvok. Skladno z izrazom (9) lahko v vsakem trenutku t določimo elongacijo molekule zraka iz njene mirovne lege x , če le poznamo amplitudo nihanja A in njegovo (krožno) frekvenco ω . Prostor, v katerem zaznamo zvočno valovanje, imenujemo **zvočno polje**.

Medtem ko se elongacija x neprestano spreminja, ima amplituda A konstantno vrednost, ki je enaka največji doseženi elongaciji x . V praksi uporabljamo kot ustrezno merilo neko povprečno, točneje povedano **efektivno amplitudo** A_{ef} , ki je z maksimalno vrednostjo povezana z izrazom

$$A_{\text{ef}} = A / \sqrt{2} \quad (21)$$

Izraz za efektivno vrednost amplitude (21) velja le za sinusno nihanje. Z efektivno vrednostjo amplitude smo dobili parameter, ki se s časom ne spreminja in je torej konstanten.

4.2. Hitrost nihanja

Molekule zraka nihajo okrog svojih mirovnih leg podobno, kakor niha nihalo na vijačno vzmet, če ga povlečemo iz mirovne lege in nato spustimo ter prične nihat v vertikalni smeri. Med nihanjem se hitrost molekul neprestano spreminja. Trenutno vrednost hitrosti lahko izračunamo s pomočjo osnovne enačbe nihanja (9) in prvega odvoda elongacije po času

$$v = dx / dt = d(A \sin \omega t) / dt = \omega A \cos \omega t \quad (22)$$

Iz istega razloga kot amplitudo je tudi hitrost smotrneje opisati z njeno efektivno vrednostjo, ki dobi obliko

$$v_{\text{ef}} = v_0 / \sqrt{2} = \omega A / \sqrt{2} \quad (23)$$

Hitrost nihanja molekule zraka torej ni odvisna samo od amplitude nihanja, ampak tudi od njene frekvence.

4.3. Zvočna energija

V določenem trenutku ima vsaka nihajoča molekula zraka kinetično energijo, ki je enaka polovici produkta mase in kvadrata njene trenutne hitrosti:

$$W = mv^2 / 2$$

Ker se hitrost spreminja, se bo z njo spreminjala tudi trenutna vrednost kinetične energije. V praksi nas bolj zanima efektivna vrednost kinetične energije, ki je določena z efektivno vrednostjo hitrosti:

$$W = m(v_0 / \sqrt{2})^2 = m v_{\text{ef}}^2 \quad (24)$$

Med molekulami, ki nihajo z enakimi amplitudami, imajo večjo energijo tiste, ki nihajo z višjo frekvenco. Kinetično energijo molekul zraka imenujemo **zvočna energija**.

4.4. Zvočni tok

Zvočno energijo W , ki je določena z izrazom (24), imajo molekule zraka v določeni prostornini V . Za prakso ta parameter nima velikega pomena. Bolj pomembna je energija, ki jo nosi zvočno valovanje s seboj z enega na drugi kraj in jo imenujemo **zvočni tok**. Zaradi pomembnosti tega parametra ga bomo izračunali v več korakih, Zvočni tok j je po definiciji enak množini zvočne energije W , ki gre v časovni enoti t pravokotno skozi ploskev S , torej

$$j = W / S t \quad (25)$$

Vstavimo za W izraz (24), pomnožimo števec in imenovalc z dolžino poti l in dobimo

$$j = m l v_{\text{ef}}^2 / S l t$$

Izraz $(m / S l)$ je enak gostoti zraka ρ , $l / t = c$ pa hitrosti širjenja zvoka. Tako sledi končni izraz:

$$j = \rho c v^2 \quad (26)$$

v katerem smo zaradi enostavnosti izpustili oznako za efektivno vrednost hitrosti ter bomo odslej vse časovno spremenljive parametre razumeli zgolj kot njihove efektivne vrednosti. Razsežnost enote zvočnega toka je po definiciji 1 W/m^2 ali 1 kg s^{-3} . V tabeli 1 vidimo vrednosti zvočnih tokov za nekaj najbolj značilnih virov zvoka.

Vir zvoka	j
slušni prag	10^{-12} W/m^2
šelesenje 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, strojna tkalnica	10^{-2}
pnevmatična kladiva	10^{-1}
letalski motor v razdalji 10 m	1
vojaški top	10
prag bolečine	100

Tabela 1: Zvočni tok nekaterih virov zvoka
(preslikano iz [10])

4.5. Zvočni tlak

Doslej opisani parametri zvočnega polja (amplituda, hitrost in zvočni tok) nazorno predstavljajo dogajanja v zvočnem polju, imajo pa to slabo stran, da niso neposredno merljivi. Tako ne moremo z nobenim sredstvom izmeriti niti trenutne, niti efektivne vrednosti amplitude ali hitrosti nihanja molekul zraka. Edini parameter, ki ga lahko izmerimo je **zvočni tlak**. V zgoščinah so molekule zraka bolj stisnjene in je v njih zračni tlak višji od normalnega. V prisotnosti zvočnega valovanja se potemtakem zračni tlak poveča za efektivno vrednost zvočnega tlaka. Te spremembe lahko merimo z občutljivimi merilnimi mikrofoni od najnižjega tlaka 10^{-9} bara pa vse do vrednosti 10 barov ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ N/m}^2$). Efektivna vrednost zvočnega tlaka je sorazmerna efektivni vrednosti hitrosti nihanja molekul zraka v . Sorazmernostni faktor je zvočna upornost $Z = \rho c$ in velja

$$p = \rho c v = Z v \quad (27)$$

4.6. Ohmov zakon akustike

Izraz (27) ima svojo analogijo v elektrotehniki, kjer je vrednost napetosti U enaka produktu iz upornosti R in toka I , torej $U = R I$. Ta produkt je znan kot Ohmov zakon. Podobno povezavo predstavlja tudi izraz (27), po katerem je zvočni tlak p enak produktu zvočne upornosti Z in efektivne hitrosti nihanja molekul zraka v . Zato je izraz (27) znan kot **Ohmov zakon akustike**. Zvočni tlak p ustreza električni napetosti U , efektivna hitrost nihanja molekul zraka v pa električnemu toku I . Razmerje med njima je enako zvočni oziroma električni upornosti. Izraz (27) omogoča izraziti zvočni tlak z zvočnim tokom, hitrostjo in amplitudo. V tabeli 2 vidimo, kako lahko izrazimo en parameter zvočnega polja z drugimi.

	A	v	j	p
A	-	$\frac{v}{\omega}$	$\frac{\sqrt{j}}{\omega\sqrt{\rho c}}$	$\frac{p}{\rho c \omega}$
v	ωA	-	$\sqrt{\frac{j}{\rho c}}$	$\frac{p}{\rho c}$
j	$\rho c \omega^2 A^2$	$\rho c v^2$	-	$\frac{p^2}{\rho c}$
p	$\rho c \omega A$	$\rho c v$	$\sqrt{j \rho c}$	-

Tabela 2: Pretvorba parametrov zvočnega polja

4.7. Elektro-akustična analogija

Analogija med akustičnimi in električnimi pojavi omogoča samo pomnjenje bolj abstraktnih parametrov zvočnega polja, pa tudi lažjo razlago. Oglejmo si ustrezno primerjavo električnih in akustičnih parametrov:

U	- električna napetost (V),	p	- zvočni tlak (Pa),
I	- električni tok (A),	v	- hitrost nihanja delcev (m/s),
R	- električna upornost (Ω),	ρc	- zvočna upornost (rayl),
$U = R I$	električni Ohmov zakon,	$p = \rho c v$	akustični Ohmov zakon,
P	- električna moč (W),	j	- zvočni tok (W/m ²),
$P = U I$,		$j = p v$,	
$P = U^2 / R$,		$j = p^2 / \rho c$,	
$P = R I^2$,		$j = \rho c v^2$.	

Iz te primerjave razberemo, da ustreza zvočni tok j električni moči P .

5. FIZIOLOŠKE ZAKONITOSTI ZAZNAVANJA ZVOKA

5.1. Slušni prag

Današnje merilne naprave omogočajo zelo natančne meritve zvočnega tlaka in frekvence. Zato ni nemogoče izmeriti celo tlak, ki ga uho sploh ne zaznava. Za prakso je posebno pomembna mejna vrednost, pod katero uho ne prepozna več zvočnih dražljajev. Meritve na mnogih poskusnih osebah so pokazale, da ustreza tej meji srednja vrednost zvočnega tlaka

$$p_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa} \quad (28)$$

Imenujemo ga slušni prag človeškega ušesa p_0 in velja pri frekvenci nihanja 1000 Hz. S pomočjo tabele 2 lahko preračunamo zvočni tlak p_0 v ustrezen zvočni tok j_0 in dobimo

$$j_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (29)$$

Ob tej vrednosti se velja zamisliti. Velikost bobniča v ušesu meri okroglo 1 cm^2 ali 10^{-4} m^2 . Pri tem pragu pada nanj moč $10^{-12} \text{ W/m}^2 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 10^{-16} \text{ W}$, iz česar spoznamo, kako občutljiv in dragocen instrument je naše uho!

5.2. Weber-Fechnerjev zakon

Številni poskusi zaznavanja zvoka so pokazali, da občutek jakosti zvoka ni v linearni (premi) odvisnosti z ustreznim dražljajem. Človekov slušni mehanizem ne zaznava npr. dvakrat, trikrat, štirikrat močnejšega zvočnega tlaka dvakrat, trikrat, štirikrat glasneje. Rezultate podrobnih raziskav za vse čutne zaznave sta strnila Weber in Fechner v znameniti psihofizični zakon, ki pravi, da je občutek O sorazmeren logaritmu dražljaja D , kar lahko zapišemo v obliki.

$$O \approx \log D \quad (30)$$

Weber-Fechnerjev zakon velja tako za zaznavanje jakosti zvoka, kot tudi frekvence, kar bomo spoznali v nadaljevanju.

5.3. Jakost zvoka – decibeli

Zvočni tok j smo definirali z energijo, ki gre v 1 s skozi ploskev 1 m^2 . Ta v smislu Weber-Fechnerjevega zakona ustreza dražljaju. Odziv ušesa na ta dražljaj mora biti potemtakem logaritmichen. Občutek, ki ga ustvari zvočni dražljaj v ušesu, imenujemo **jakost zvoka** in jo označujemo z L . Omislimo si ustrezno lestvico in postavimo za njen začetek slušni prag $j_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ ter mu določimo jakost $L = 0$. Dražljaj lahko zapišemo z razmerjem j / j_0 , občutek (jakost) pa kot logaritem tega razmerja. Zanj je bila izbrana enota 1 Bel v čast izumitelju telefona Aleksander G. Bellu. Ta enota je za prakso prevelika, zato je bila prevzeta 10-krat manjša enota 1 decibel z oznako 1 dB. Izraz za jakost zvoka L dobi s pomočjo Weber-Fechnerjevega zakona obliko.

$$L = 10 \log(j / j_0) \text{ dB} \quad (31)$$

V izrazu (31) se pojavlja desetiški (Briggsov) logaritem. V kolikor računamo z naravnimi logaritmi, moramo pomnožiti njihovo vrednost s pretvornim faktorjem 0,4343. Tako dobimo podoben izraz

$$L = 4,343 \ln(j / j_0) \text{ dB} \quad (32)$$

Vsakemu zvočnemu toku ustreza določena glasnost, zato lahko spremenimo vrednosti v tabeli 1 v decibele in jih zapišemo v tabeli 3.

Vir zvoka	L (dB)
slušni prag	0
šelesenje 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, strojna tkalnica	100
pnevmatična kladiva	110
letalski motor v razdalji 10 m	120
vojaški top	130
prag bolečine	140

Tabela 3: Jakost nekaterih virov zvoka
(preslikano iz [10])

Zvočna jakost 130 dB lahko že v hipu povzroči poškodbe bobniča, ušesu škodljive pa so tudi vse jakosti nad 80 dB. Zaradi tega morajo delavci, ki delajo v hrupnih prostorih, ušesa pokriti z **glušniki**, ki znižujejo raven hrupa v ušesu in ga ščitijo pred poškodbami. Mnoge poškodbe sluha se poznajo šele čez več let ali v pozni starosti. Nevarno je tudi daljše zadrževanje v prostorih s hrupno glasbo (disko), posebna nevarnost pa preti še zlasti izvajalcem preglasne glasbe. Jakost zvoka lahko izrazimo tudi s pomočjo zvočnega tlaka p . Iz tabele 2 sledi:

$$j = p^2 / \rho c$$

Razmerje j / j_0 je enako razmerju $(p/p_0)^2$, kjer je p_0 že omenjeni zvočni tlak slušnega praga (28). Za vrednost logaritma j / j_0 sledi

$$\log(j / j_0) = \log(p / p_0)^2 = 2 \log(p / p_0)$$

Z zvočnim tlakom opisana izraza (31) in (32) dobita obliko

$$L = 20 \log(p / p_0) \text{ dB in } L = 8,686 \ln(p / p_0) \quad (33)$$

Povprečno človekovo uho zaznava še razlike v jakosti zvoka, ki niso manjše od

$$\Delta L = 1 \text{ dB},$$

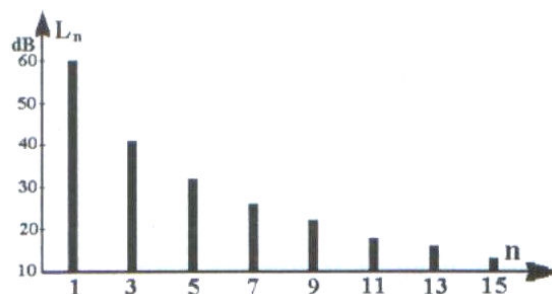
zato je delitev jakosti zvoka na decibele smotrna tudi s fiziološkega stališča.

5.4. Spekter moči

Pri obravnavi Fourierove vrste smo prikazali spekter z amplitudami ustreznih harmonskih nihanj in slednja poenostavili z omejitvijo zgolj na sinusne člene. Povedali smo, da ne moremo neposredno meriti amplitud, temveč le ustrezne zvočne tlake p . Temu ustrezna amplituda je $A = p / \rho c \omega$ (glej tabelo 2). Tako ustreza tlaku p_1 amplituda A_1 , tlaku p_n pa amplituda A_n . Zaradi Weber-Fechnerjevega zakona bo bolj umestno izražati tudi Fourierove koeficiente z ustreznimi jakostmi L_n glede na vrednost koeficienta prvega člena harmonske vrste. Tako dobimo

$$L_n = 20 \log(p_n / p_1) = 20 \log(A_n / A_1) \quad (34)$$

Dobljene vrednosti L_n so v glavnem negativne, ker velja $A_n / A_1 < 1$. To lahko grafično prikažemo bodisi z negativnimi vrednostmi glede na amplitudo prvega harmonskega člena ali pa tako, da določimo osnovnemu nihanju neko amplitudo, npr. 60 dB ter od nje odštevamo vrednosti ostalih amplitud. Slika 32 kaže primer trikotnega nihanja z lihimi členi, ki padajo kot $1/n^2$. Izračun vrednosti je prikazan v tabeli 4.



Slika 32: Prikaz spektra moči trikotnega nihanja
(preslikano iz [10])

n	1	3	5	7	9	11	13	15
$1/n^2$	1	1/9	1/25	1/49	1/81	1/121	1/169	1/225
$L_n = 20 \log(1/n^2) \text{ dB}$	0	-19	-28	-34	-38	-42	-44	-47
$60 \text{ dB} + L_n \text{ dB}$	60	41	32	26	22	18	16	13

Tabela 4. Prikaz Fourierovih koeficientov v dB

(preslikano iz [10])

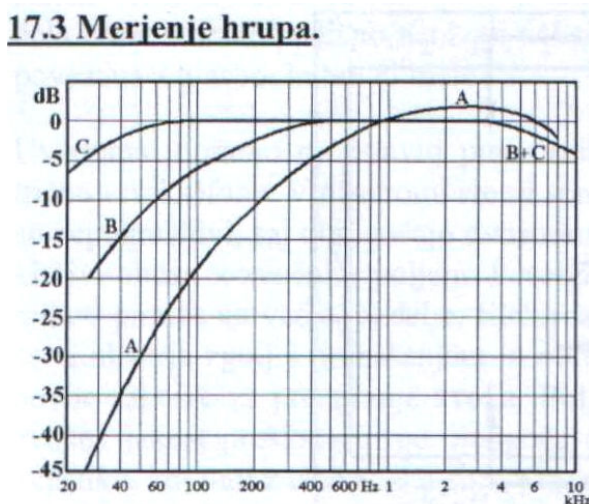
Spekter, v katerem so Fourierovi koeficienti izraženi z jakostmi L_n , imenujemo **spekter moči** (tudi močnostni spekter). Zaradi logaritemskega merila padajo amplitude počasneje kot pri amplitudnem spektru. Poleg tega lahko pregledamo in primerjamo večje število harmonskih členov. Pri amplitudnem spektru, kot tudi pri spektru moči, lahko srečamo na abscisi bodisi linearno frekvenčno, bodisi logaritemsko merilo.

5.5. Merjenje hrupa

Profesionalne merilnike hrupa izdelujeta v Evropi danska tovarna Bruel & Kjaer ter nemška Rhode & Schwarz. Z njimi je moč napraviti natančne meritve v najrazličnejše namene. Merilnik s pomočjo zelo občutljivega mikrofona na merjenem mestu ugotavlja merjeni frekvenci ustrezen zvočni tlak. Iz njega izračuna zvočno jakost v decibelih.

Ta fizikalna meritev pa ne daje rezultatov, ki bi bili uporabni na področju hrupa in sluha. Vzrok za to je občutljivost ušesa, ki se s frekvenco močno spreminja. V intervalu od 1 000 Hz do 3 000 Hz so te spremembe majhne, do neke mere celo zanemarljive, postanejo pa kritične pri višjih in nižjih frekvencah. Pogosto je slišnost zvoka povezana z nivojem jakosti osnovnega tona, zaradi česar je Barkhausen uvedel pojem nivo slišne jakosti ali tako imenovani FON (phon). Pri frekvencah 1000 Hz se vrednosti fona in dB ujemata, torej sta identični. Torej kaj nam dejansko pomeni fon? Če poenostavim definicijo, lahko zapišemo, da je fon enak občutek glasnosti čez celoten frekvenčni razpon slišnega področja. Torej če imamo pri frekvenci 1 kHz jakost zvoka 40 dB, je to popolnoma enako nivoju glasnosti 40 fonov, ampak samo pri tej nazivni frekvenci. Tako je v praksi prišlo do več

empiričnih krivulj, ki naj bi izravnale nelinearno frekvenčno karakteristiko ušesa. **ISO** (International Standards Organisation) je priporočila tri krivulje, po katerih naj bi se meril hrup in bi se jakost izmerjenega hrupa iz decibelov pretvarjala v ustrezne vrednosti v fonih [10: str. 143]. Te tri krivulje so prikazane na sliki 33 in označene z **A**, **B** in **C**.



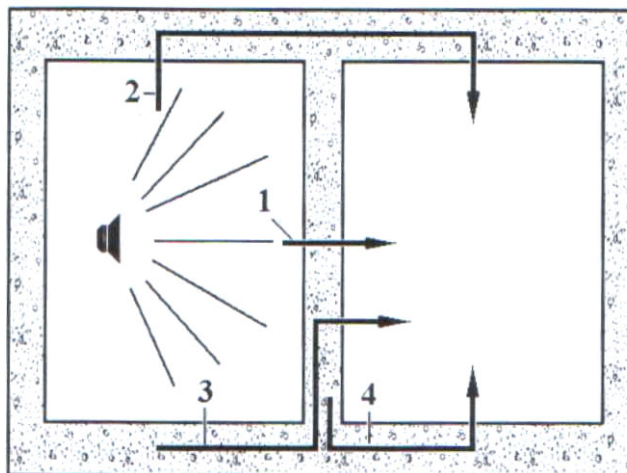
Slika 33: Tri različne krivulje (A, B in C), določene po ISO standardnih za pretvorbo izmerjenih decibelov v ustrezne vrednosti v fonih
(preslikano iz [10])

Po priporočilih ISO naj bi se krivulja **A** uporabljala za meritve pri nižjih jakostih med 30 in 60 F, krivulja **B** za jakosti okrog 70 dB in krivulja **C** za visoke jakosti od 80 dB do 100 dB. To velja za vse meritve hrupa v tovarnah, na cesti, v javnih lokalih, v pisarnah in stanovanjih, kot tudi za merjenje dušenja sten, vrat, podov, zidov, sten in izolacijskih snovi. Zaradi treh različnih standardnih krivulj je pogosto prihajalo do nesporazumov in napak, kar je vodilo v to, da so se v zadnjem času odločili meriti hrup samo s pomočjo krivulje A, ki se še najbolj približuje krivulji občutljivosti ušesa, ter izmerjeno vrednost označiti z **L(A)**.

5.6. Preprečevanje hrupa

Hrup preprečujemo na dva načina. Prvi in najpomembnejši način je preprečevanje hrupa pri samem viru. V kolikor ne moremo vplivati na vir, skušamo preprečevati prehajanje v druge prostore. Hrup se lahko prenaša v prostor iz zunanosti, lahko pa tudi iz prostora v prostor preko gradbene konstrukcije. Oglejmo si najprej primer, ko je vir hrupa v samem prostoru opazovanja. Predstavimo ga lahko s strojem, ki stoji na podu. Njegov hrup se prenaša preko tal in skozi obdajajoči zrak. Prvega zmanjšamo tako, da postavimo stroj na elastične podstavke. Zadoščajo že podstavki iz ne pretrde gume. Če to ne zadošča, se postavi stroj na vzmetne amortizerje. V primeru, da stroj seva močan hrup tudi v okoliški prostor, ga je treba obdati z zvočnim oklepom in njegovo notranjost obložiti z absorpcijsko snovjo (3), penasto gumo, stiroporom, mineralno volno ipd. Najboljši rezultat se dobi običajno s kombiniranjem obeh načinov.

Novejša gradbena tehnika zahteva poleg potrebne statične trdnosti in toplotne izolacije tudi ustrezno zvočno izolacijo sten. Kako se zvok prenaša iz prostora v prostor, kaže slika 34. Zvočno valovanje (1) pade na vmesno steno in jo zaniha. Zato prične cela površina stene sevati zvok v sosednji prostor.



Slika 34: prikazuje prenašanje zvoka iz prostora v prostor
(preslikano iz [10])

Prehod zvoka je tem močnejši, čim tanjša in večja je stena. Za večino gradbenih materialov velja, da je dušenje v steni manjše pri nižjih frekvencah. Zvok (1) lahko izdatno dušimo le z debelejšo steno. Dušenju zvoka skozi različne gradbene materiale ustrezajo orientacijske vrednosti v tabeli 5.

Material	Dušenje (dB/cm)
mavec	4
steklo	7
beton	8
iverna plošča	13
vezana plošča	15
aluminij	110
jeklo	300

Tabela 5. Dušenje zvoka v različnih snoveh
(preslikano iz [10])

Oblaganje sten z absorpcijskimi ploščami nima tolikšnega vpliva na dušenje. Včasih so vmesne stene celo dovolj debele, a kljub temu zaznavamo hrup v sosednji sobi. To je posledica posrednega zvoka, ki prehaja skozi stranske stene (2), (3) in (4). Praviloma je ta zvok šibkejši, izognemo pa se mu lahko le z vdelavo posebnih filtrskih pasti v same stene. Na tem mestu moramo ponoviti, da je dosti lažje preprečevati hrup pri njegovem viru, kot pa vgrajevati dodatno izolacijo. Pri dovolj debelih stenah, a še vedno prisotnem hrupu, ne smemo pozabiti na širjenje zvoka preko instalcijskih cevi vodovoda, plinovoda in centralne kurjave, posebej pa še skozi prezračevalne cevi. Zvočna izolacija dveh sosednjih prostorov zahteva 52 dB do 58 dB dušenja.

Nekoliko manjše so težave pri prehajanju hrupa skozi vrata in okna. V prvi vrsti je treba zagotoviti dobro tesnjenje. To se lahko doseže z gumijastimi trakovi, ki služijo tudi toplotni izolaciji. Pri dvojnih vratih običajno ni potrebe po zvočni izolaciji, enojna vrata pa lahko izoliramo z mehko oblogo iz steklene volne ali podobne snovi. Običajno zadošča že enostranska obloga, čeprav daje boljši rezultat dvostranska

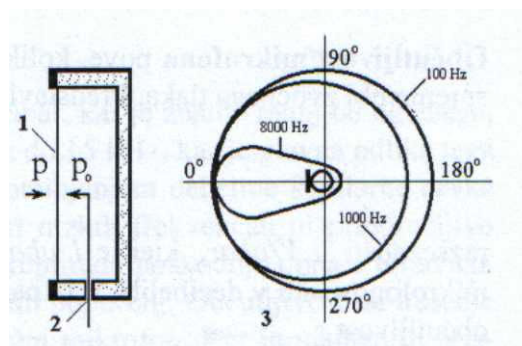
obloga. Tehnika izolacije hrupa je samostojna panoga gradbene in arhitektonske akustike in je mnogo preobširna, da bi jo posebej obravnavali v tem diplomskem delu, v katerem želimo podati samo kratek pregled zaščite proti hrupu iz okolice, katera nam bo pomagala zmanjšati vpliv okoliškega hrupa na merilne rezultate šuma elektromotorjev.

6. ELEKTROAKUSTIKA

Današnje akustike si ne moremo predstavljati brez nauka o elektriki. Elektroakustika je samostojna veda, ki se stalno razvija in ji lahko napovemo še nesluten razvoj. Napravam, ki spreminjajo zvočno nihanje v električno rečemo mikrofoni. V nasprotni smeri spreminjajo zvočniki električno nihanje v zvočno. Prvi in drugi so nepogrešljivi, saj omogočajo dvostransko komunikacijo med električnimi napravami in človekom, ki živi obdan z zvočnim poljem.

6.1. Mehansko-električni pretvorniki – mikrofoni

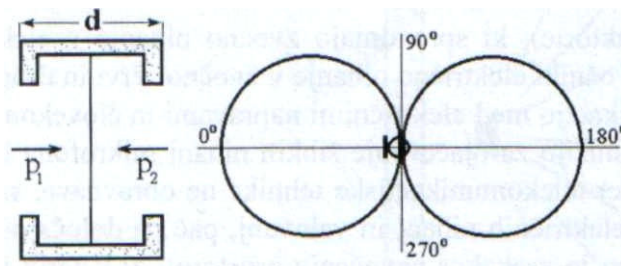
So najbolj znani in razširjeni mehansko-električni pretvorniki, ki pretvarjajo zvočna valovanja v električna nihanja. Vsak mikrofona ima ohišje in opno. Slednja mora biti dovolj velika, da nanjo vpade dovolj zvočne energije, po drugi strani pa ohišje ne sme prekomerno povečati razsežnosti in teže. Glede na način, kako zvočno valovanje zaniha opno, delimo mikrofona v tlačne in gradientne. Pri **tlačnem mikrofona** (slika 35) pritiska zvočni tlak p samo na zunanjo stran opne (1). V notranjosti vlada tlak okolice p_0 , kar omogoča majhna kapilarna odprtinica (2) v ohišju. Ta skrbi, da je notranji tlak v povprečju enak zunanjemu, a ne more slediti hitrim spremembam zunanjega zvočnega tlaka. Ker je tlak okrog mikrofona v vseh smereh enak, nihanje opne pri nizkih frekvencah ni odvisno od smeri vpadnega zvoka.



Slika 35: tlačni mikrofona in njegova krožna karakteristika
(preslikano iz [10])

Ustrezno smerno karakteristiko se ponazarja s kroglo, zato govorimo o krogelni (v dveh dimenzijah o krožni) karakteristiki. Pri visokih frekvencah postane valovna dolžina primerljiva z razsežnostmi mikrofona in tlak pred mikrofonom je drugačen od tistega za njim. **Krožna karakteristika** mikrofona postaja usmerjena, kar vidimo na (3). Simbol v središču karakteristike označuje mikrofonsko usmerjenost.

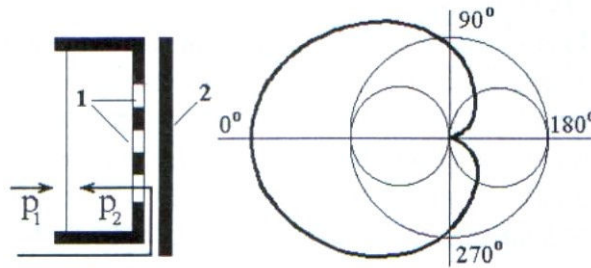
Gradientni mikrofoni so napravljeni tako, da zvočni tlak doseže opno z obeh strani. Opna zaniha takrat, kadar se oba tlaka p_1 in p_2 med seboj razlikujeta. Izraz **"gradient"** iz višje matematike lahko na tem mestu nadomestimo preprosto z izrazom **"razlika"**. Potemtakem deluje gradientni mikrofonski na podlagi različnega tlaka pred in za opno. V kolikor bi opna visela prosto v zraku, bi bil tlak na obeh straneh enak. Ker pa ima mikrofonski določeno širino d (slika 36), pride do razlike v tlaku $p_1 - p_2$, ki pomakne - zaniha opno.



Slika 36: Gradientni mikrofonski (levo) in njegova krožna karakteristika (desno)
(preslikano iz [10])

Iz slike je moč razbrati, da bo zanihalo opno le tisto zvočno valovanje, ki vpade pravokotno na opno. V nasprotju s tlačnim mikrofonom, gradientni ni občutljiv na zvočna valovanja, ki vpadajo s strani. To kaže tudi smerna karakteristika v obliki osmice, kateri pravimo **osmična karakteristika**.

Kombinirani mikrofoni (tudi fazni mikrofoni) koristijo tako lastnosti tlačnih kot gradientnih mikrofonskih. Poenostavljeno obliko kombiniranega mikrofona vidimo na sliki 37.



Slika 37: Kombinirani mikrofon (levo) in njegova krožna karakteristika (desno)
(preslikano iz [10])

Za izenačevanje zunanjskega in notranjskega tlaka skrbijo odprtine na dnu ohišja (1). Ob te odprtine pa je na majhni oddaljenosti prislonjena ploščica (2), ki skrbi za to, da izenačevanje tlakov p_1 in p_2 ne bi potekalo prehitro. Posledično se kombinirata oziroma seštejeta tudi obe smerne karakteristiki. Dobljena karakteristika ima obliko **kardioide** ali **ledvice** in je močno usmerjena naprej. Kombinirani mikrofon delno sprejema zvok tudi s strani, ni pa občutljiv za zvok od zadaj.

Navedeni primeri kažejo, da je smerna karakteristika mikrofona odvisna le od njegove konstrukcije, ne pa od načina pretvarjanja zvočnega valovanja v električno nihanje. Zato razumemo, zakaj imajo lahko enaki mikrofoni različne smerne karakteristike. Pri nekaterih mikrofoni lahko celo s preklpom majhnega pretikala spremenimo tudi njegovo smerno karakteristiko. Pri obravnavanju posameznih vrst nas poleg smerne karakteristike zanimata tudi občutljivost mikrofona (*angl. sensitivity*) in frekvenčna karakteristika.

Občutljivost mikrofona pove, kolikšna je sprememba napetosti na izhodu mikrofona pri določeni spremembi zvočnega tlaka. Predstavljena je z izrazom

$$s = \Delta U / \Delta p \quad (35)$$

razsežnosti $1 \text{ V}/\mu\text{bar}$, kjer je $1 \text{ V}/\mu\text{bar} = 0,1 \text{ Pa} = 0,1 \text{ N/m}^2$. V elektrotehniki podajajo občutljivost mikrofona tudi v decibelih.

Za izračun občutljivosti v decibelih se za standardno vrednostjo mikrofona predpostavi vrednost $1 \text{ V}/\mu\text{bar}$, občutljivost s pa izračunamo po naslednji enačbi:

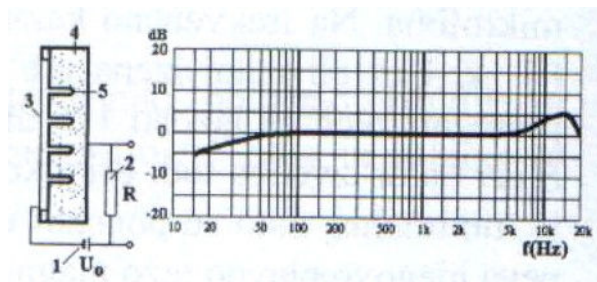
$$s = 20 \log \left(\frac{\Delta U}{\Delta p} \frac{\mu\text{bar}}{\text{V}} \right)$$

Ker je običajna izhodna napetost mikrofona okrog 1 mV je vrednost zgornjega ulomka manjša od 1 ter ustrezni logaritem negativen. Zato je občutljivost mikrofona izražena z negativno vrednostjo decibelov.

Frekvenčna karakteristika je grafični potek občutljivosti v slišnem frekvenčnem področju. Idealno frekvenčno karakteristiko bi predstavljala vodoravna črta, torej konstantna občutljivost v celotnem frekvenčnem področju. Za lažjo primerjavo frekvenčnih karakteristik različnih mikrofona se običajno izbere njihova srednja vrednost 0 dB .

6.2. Kondenzatorski mikrofona

Ta mikrofona vsebuje kondenzator, ki je zaporedno povezan z virom napetosti U_0 (1) in uporom R (2) (slika 38).



Slika 38: Frekvenčna karakteristika kondenzatorskega mikrofona
(preslikano iz [10])

Eno elektrodo kondenzatorja predstavlja kar sama kovinska opna (3). Vpadajoče zvočno valovanje zaniha opno in spreminja razdaljo med opno in masivno elektrodo (4). V istem ritmu se spreminja tudi kapacitivnost kondenzatorja in z njo padec napetosti na upor R . Ta je razmeroma majhen in ga moramo ojačiti s predojačevalnikom, kar predstavlja pravzaprav edino slabo stran kondenzatorskega mikrofona. Predojačevalnik se vgrajuje kar v samo ohišje mikrofona, do katerega pa je treba v tem primeru pripeljati še dodatni žici za napajanje. Sicer pa so ostale lastnosti kondenzatorskega mikrofona zelo dobre. Občutljivost od $1 \text{ mV}/\mu\text{bar}$ do $2 \text{ mV}/\mu\text{bar}$ se lahko z utorji na debelejši elektrodi (5) poveča na $3 \text{ mV}/\mu\text{bar}$ - $5 \text{ mV}/\mu\text{bar}$ in je zadovoljivo konstantna v obsegu od 20 Hz do 13 kHz . S posebnimi konstrukcijami je moč povišati zgornjo mejo do 20 kHz in celo do 100 kHz ! Zato uporabljajo kondenzatorske mikrofone kot merilne mikrofone, zlasti še na področju ultrazvoka. Kapacitivnost samega kondenzatorja je majhna, okrog 20 pF - 100 pF , medtem ko mora biti upornost R zelo velika, $10 \text{ M}\Omega$ - $100 \text{ M}\Omega$. Enosmerni vir napetosti U_0 mora zagotoviti napetost od 100 V do 200 V . Opna je običajno izdelana iz metalizirane folije debeline okrog $10 \mu\text{m}$, tolikšna pa je tudi razdalja med obema elektrodama. Nedvomno predstavljajo kondenzatorski mikrofoni dandanes najbolj kakovostne mikrofone, zato se uporabljajo pri vseh zahtevnih snemanjih v studiih. Vse to jih uvršča tudi med cenovno najdražje.

7. IZVEDBA MERITEV ZVOČNE SLIKE ČRPALKE

Ydria Motors, d.o.o., Podskrajnik – Cerknica je podjetje, ki se ukvarja z množično proizvodnjo asinhronskih motorjev majhnih moči (do 45 W). Vse izdelane motorje se električno in vizualno 100 % kontrolira, vendar se kljub 100 % kontroli dogaja, da kupec motor zavrne zaradi določene napake, ki se v večini primerov odraža kot povečana glasnost motorja. V ta namen so na nekaterih proizvodnih linijah že nameščeni mikrofoni ter zvočniki, ki pomagajo zaposlenim na 100 % končni kontroli zaznati preglasne motorje. Pomanjkljivost takega načina testiranja je precejšnja, saj je v celoti odvisna od zaposlenega na liniji, ki se v nekaj sekundah na podlagi slišane odloči, ali je motor sprejemljiv ali ne. Delo v treh izmenah ne omogoča enakega kriterija, prav tako ne 8 urni delavnik, saj ima zaposleni na proizvodnji liniji po 8 urah dela in proizvodnega hrupa zelo spremenjen kriterij za slušno zaznavanje.

7.1. Zakaj težnja po avtomatskem merjenju zvočnega spektra?

Z avtomatskim merjenjem bi odpravili vpliv človeškega faktorja ter bi zanesljiveje izločili motorje, ki ne ustrezajo zahtevam kupca. Izvedba avtomatskega merjenja zvočnega spektra v proizvodnji je zahteven postopek, saj imamo na liniji mnogo zunanjih vplivov, ki bi jih morali izločiti (brizgalnik črnila, tekoči trak, prevozna sredstva v bližini proizvodnje linije, pnevmatski ventili, itd.).

7.2. Akustična komora

Kakovostno merjenje hrupa elektromotorjev smo zagotovili tako, da smo izločili šume iz okolja. V ta namen smo izdelali gluho komoro, katero prikazuje slika 39.



Slika 39: Gluha komora

Njena naloga je zadušiti motilni hrup iz okolice in preprečiti valovanje zraka v sami škatli. Zgrajena je iz ustreznih materialov in pravilno dimenzionirana.

Akustična komora je narejena iz dveh komor, kateri imata zaradi zvočne izolacije med stranicami, 8 centimetrski prostor, zapolnjen s stekleno volno [12]. Steklена volna je ena izmed najbolj uporabljenih zvočnih izolacijskih materialov tako v svetu kot pri nas. Je dober toplotni in zvočni izolator, vodoodbojna, paroprepustna, odporna proti vlagi, staranju, odporna na delovanje mikroorganizmov, brez vonja in kemično nevtralna [13].

Stranice so narejene iz 2,2 cm širokih ivernih plošč, ki imajo neurejeno strukturo in zato preprečujejo morebitne resonančne vibracije. Za izbiro 2,2 cm debele iverne plošče smo se odločili zaradi razmerja med ceno, nosilnostjo plošče, zvočno izolacijo ter težo. Izdelana gluha komora tehta okoli 80 kg, debelejša iverna plošča bi to težo še povečala ter s tem zmanjšala njeno uporabnost, saj je za vsako meritev potrebno privzdigniti dva pokrova komore. Z izbiro tanjše iverne plošče pa bi dosegli manjšo težo, kar bi pomenilo manjše dušenje predvsem nizkih frekvenc in večjo krhkost pri transportu komore. Stranice smo sestavili tako, da smo spoje zatesnili s silikonskim kitom ter jih zavijali.

Zunanja površina komore pa je gladka, da bolje odbija motilni hrup iz okolice, notranjost pa obdana s stožčasto penasto gumo, ki dobro absorbira zvok in tako preprečuje njegovo odbijanje.

Pričakuje se, da bomo gluho komoro v prihodnje uporabljali za laboratorijske meritve šuma in vibracij. V ta namen smo jo opremili tudi z vso potrebno elektroinstalacijo – slika 40 (BNC konektorji, napetostni vtiči, ozemljitev ter 3,5 mm stereo jack vtikač).



Slika 40: Elektroinstalacija gluhe komore

Dimenzije škatle so izbrane tako, da sta krajši stranici $\sqrt{3}$ -krat in $\sqrt{2}$ -krat krajši od najdaljše (1 m). S tem dosežemo, da ne pride do resonance zvoka v škatli, saj sta 2 in 3 praštevili in zato se večkratniki dolžin vseh treh stranic nikoli ne ujamejo [20]. Komora ima dva pokrova, v katera smo vgradili silikonska tesnila ter jo opremili s štirimi nastavljivimi zatiči, katerim lahko precizno nastavimo dolžino in s tem dosežemo optimalno tesnenje obeh pokrovov.

7.3. Merilna oprema

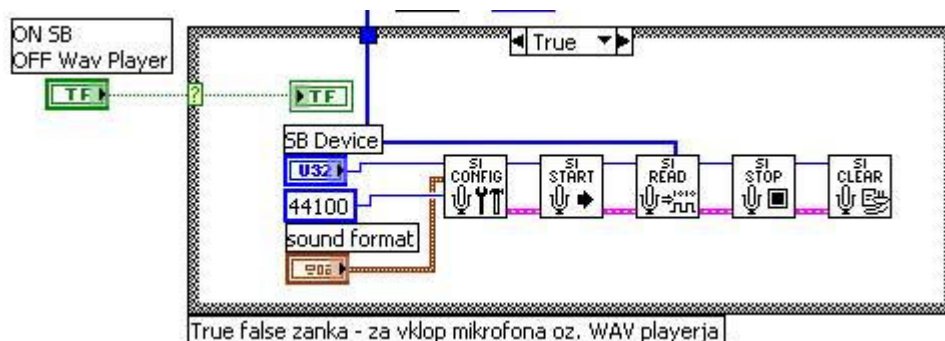
Da bi rezultate diplomskega dela lahko uporabili za izdelavo testerjev šuma na proizvodnih linijah, za meritve nismo uporabljali profesionalne in drage merilne opreme, saj cena le te preprosto ne omogoča racionalne množične uporabe. Odločili smo se, da za meritve uporabimo računalniško opremo, ki je namenjena množični uporabi.

Za merjenje smo uporabili zvočno kartico srednjega cenovnega razreda (Creative Audigy 2 – gonilniki Creative Audigy 2 (WDM) 1.7.2004, različica 5.12.4.522 [14]) in kondenzatorski mikrofonski Trust MC-1300 [15], ki je namenjen sporazumevanju preko računalnika in sodi v višji cenovni razred tovrstnih izdelkov.

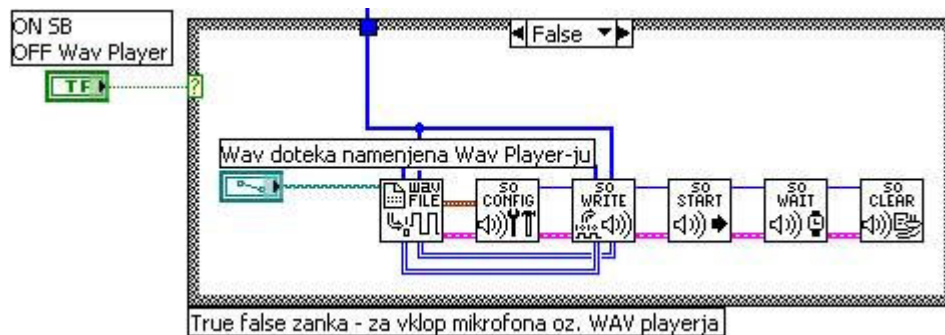
Za programsko okolje smo uporabili program Labview (verzija 7.1) [16] z dodatnim programskim orodjem za merjenje zvoka ter vibracij [17] (Sound and vibration toolkit 3.1 – April 2004). Labview je namenjen grafičnemu programiranju, ki je za večšega uporabnika hitro in enostavno.

7.4. Glavni deli programa v okolju Labview

S pomočjo Labview-a smo naredili program, s katerim iz mikrofonskega vhoda zvočne kartice (slika 40) ali iz programa Windows media player beremo vrednosti signala v obliki WAV datoteke (slika 41).

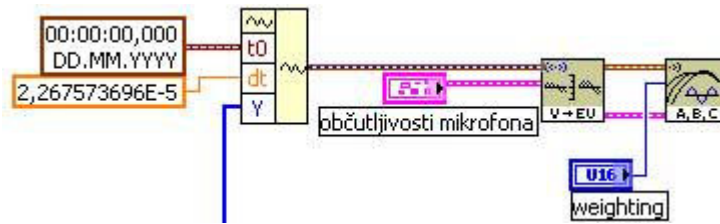


Slika 40: Prikaz branja vhoda zvočne kartice v programu Labview



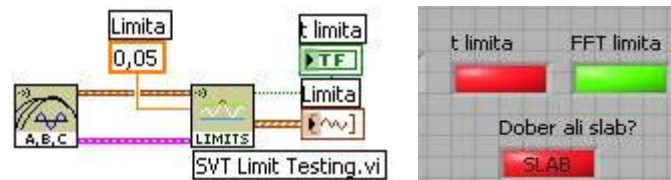
Slika 41: Prikaz branja signala iz programa Windows Media Player

Polju podatkov, ki jih vzorčimo s 44,1 kHz, je najprej potrebno določiti časovni interval zajemanja ter jih tako spremeniti v obliko signala imenovano »waveform«. Vrednost le tega pa s pomočjo občutljivosti mikrofona v mV in s »SVL Scale Voltage to EU« funkcije pretvorimo v želeno veličino, v akustiki je to tlak (Pa). Občutljivost mikrofona določimo pri njegovi kalibraciji (sekcija 7.5). Dobljeni signal nato obdelamo s filtrom krivulje A (slika 42), katera naj bi se po priporočilih ISO standardov uporabljala za meritve pri nižjih jakostih med 30 in 60 F (sekcija 5.5).



Slika 42: Od polja podatkov do signala, ki nam podaja vrednost zvočnega tlaku (Pa)

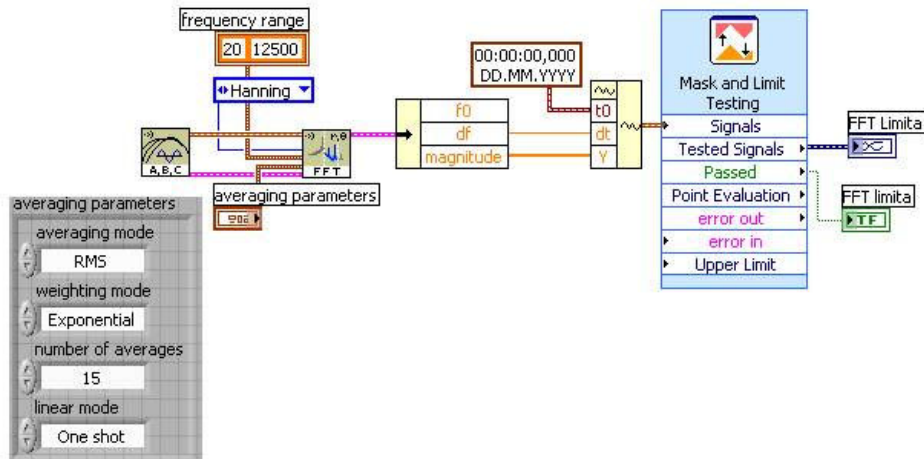
Tako obdelanemu signal smo s poskušanjem določili mejno vrednost 0,05 Pa ter ga prikazali na časovnem diagramu. Ob prekoračitvi te mejne vrednosti predpostavljamo, da je črpalka preglasna in na zaslonu se nam vklopi rdeča kontrolna lučka za časovno odvisen signal (t limita) – slika 43 (levo). Določitev mejne vrednosti signalu prikazuje slika 43 (desno).



Slika 43: Določanje mejne vrednosti časovnega signala (levo) ter rdeča kontrolna lučka ob prekoračitvi mejne vrednosti t limite (desno)

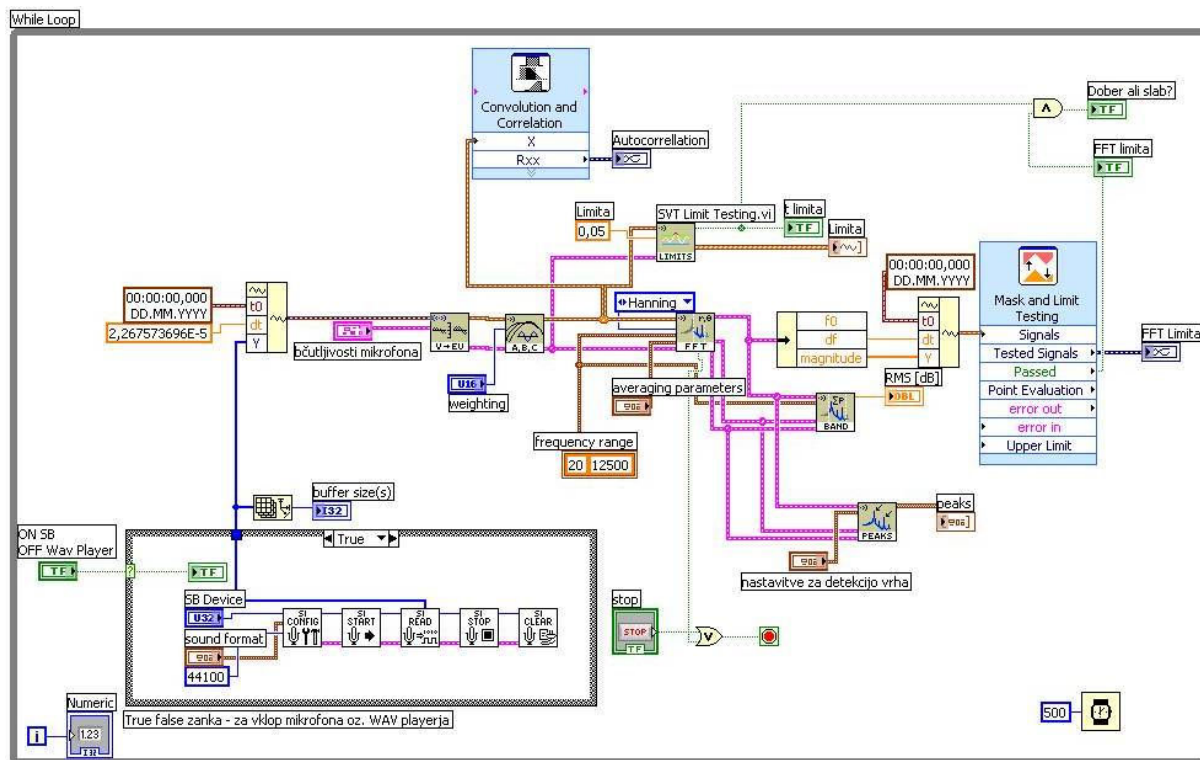
Poleg časovno odvisnega signala smo določili tudi mejne vrednosti frekvenčnega spektra v območju frekvenc od 20 Hz do 12,5 kHz, kar prikazuje slika 44. Frekvenčni razpon smo določili na podlagi izkušenj. Frekvence, ki so manjše od 20 Hz so za človeško uho praktično neslišne, prav tako so izven frekvenčnega območja uporabljenega kondenzatorskega mikrofona, zato je merjenje le teh brez pomena. Nivo zvočnega tlaka pri frekvenci 12,5 kHz povprečno znaša manj kot 4,5 dB, zato tudi frekvenčnega območja višjega od 12,5 kHz nismo upoštevali. Za prikaz časovnega odvisnega signala v frekvenčnem spektru smo uporabili funkcijo FFT (Fast Fourier Transform) skupaj z okensko funkcijo Hanning [18]. Uporaba oken vpliva na ločljivost in prepustnost spektra. Ločljivost je odvisna od širine okna, medtem ko je prepustnost odvisna od razmerja amplitud glavnega in stranskih 'valov' signala (na to vplivamo z izbiro okenske funkcije) [19]. Hanning okenska funkcija se uporablja pri obdelavi periodičnih signalov, saj z njo zmanjšamo vpliv prehodnih oz. naključnih signalov. Hanning okensko funkcijo srečujemo pri mnogih analizah, kot so npr. merjenje vrtečih napravah, obdelavi naključnih шумov, analizah govora, itd.

Ker nam v programu Labview funkcija FFT na izhodu poda velikost signala v decibelih, je bilo potrebno ta podatek ponovno pretvoriti v »waveform« obliko, saj lahko le z njo uporabljamo funkcijo »Mask and Limit Testing«, s katero smo določili mejne vrednosti frekvenčnega spektra.



Slika 44: Določanje mejne vrednosti signala preko njegovega spektra

Celoten izgled programa vidimo na sliki 45. V program smo zaradi raziskovalnega dela vključili še funkciji avtokorelacije ter iskanje najintenzivnejše frekvence (peak). S program opravimo 15 meritev po 500 ms (while loop) ter na koncu dobimo povprečno vrednost vseh meritev.

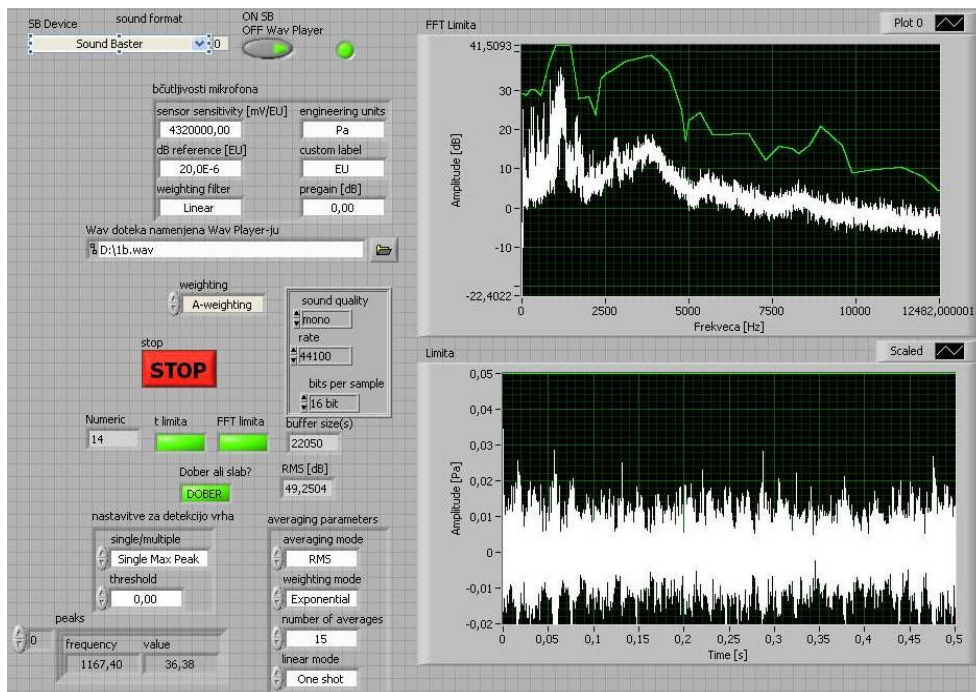


Slika 45: Izgled programa v programu Labview

Sliki 46 prikazuje pogled na uporabniško ploščo zgoraj opisanega programa ter meritev črpalke ustrezne kakovosti. Na slikah se vidi grafični prikaz zvoka po preteku vsake meritve vzorčne črpalke. Z zeleno barvo so določene mejne vrednosti časovnega ter frekvenčnega spektra (FFT), bele barva pa prikazuje vrednosti signala.

Na leva stran uporabniške plošče je prostor z nastavljivimi parametri. Med pomembnejše od njih sodi vrednost o občutljivosti mikrofona, prikaz RMS vrednosti frekvenčnega spektra ter indikator o kakovosti merjene črpalke.

Kadar vrednost spektra prekorači mejne vrednosti, nam na zaslonu zagori rdeča kontrolna lučka ter nam tako signalizira nekakovostno črpalko. Na zaslonu se prikazuje še vrednost »peak« (jakost frekvence z najvišjo amplitudo) in RMS vrednost frekvenčnega spektra (FFT).



Sliki 46: Uporabniška plošča

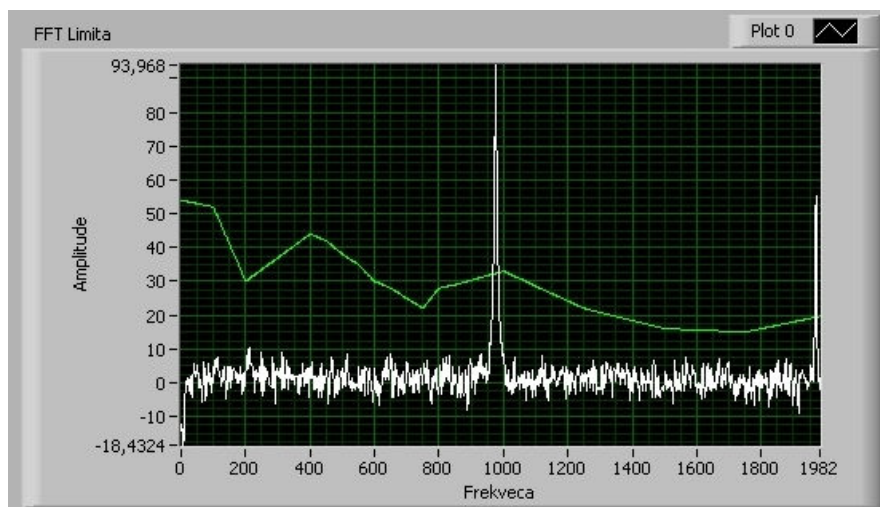
7.5. Kalibracija mikrofona

Kalibracija mikrofona je izvedena s sledljivim zvočnim virom - slika 47, ki oddaja nivo zvočnega tlaka $94 \text{ dB} \pm 0,32 \text{ dB}$ in frekvence $1000 \text{ Hz} \pm 15 \text{ Hz}$. Merilni rezultati iz zapisnika kalibracije zvočnega vira, ki je bila opravljena manj kot 2 meseca pred kalibracijo našega mikrofona, so sledeči: zvočni tlak $94,06 \text{ dB}$ pri frekvenci $994,26 \text{ Hz}$.



Slika 47: Umerjanje mikrofona

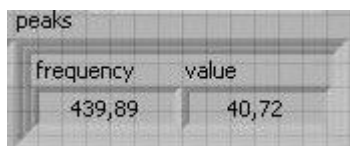
Sliki 48 prikazuje izmerjeno vrednost $93,97 \text{ dB}$ in frekvenco 987 Hz .



Slika 48: Grafičen prikaz umerjanja mikrofona

Želeli smo preveriti negotovost merjene frekvence, zato smo meritev ponovili z uglasovalcem glasbil, ki oddaja frekvenco 440 Hz ter izmerili vrednost $439,89 \text{ Hz}$ (slika 49). Frekvenco uglasovalca glasbil smo izmerili še s specialno, laboratorijsko umerjeno merilno opremo podjetja Brüel & Kjær, ki je znašala $440,6 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$.

Ugotovili smo, da je negotovost izmerjene frekvence manjša od odstotka izmerjene vrednosti, sama negotovost pa ne vpliva na umerjanje mikrofona, saj je razlika v občutljivost mikrofona pri 987 Hz in 1 kHz zanemarljiva.



peaks	
frequency	value
439,89	40,72

Slika 49: Izmerjena vrednost zvočnega vira frekvence 440 Hz

Sedaj poznamo občutljivost mikrofona pri frekvenci 1 kHz, kar še ne pomeni, da so sedaj izmerjene vrednosti na frekvenčnem območju od 20 Hz do 12,5 kHz sledljive. Ne smemo pozabiti, da uporabljamo preprost kondenzatorski mikrofona, ki nima podane frekvenčne karakteristike, zato izmerjeni merilni rezultati ne morejo biti primerljivi s profesionalno merilno opremo. To tudi ni naš cilj, saj v okviru tega diplomskega dela želimo, da bi lahko s pomočjo frekvenčnega spektra določili mejne vrednosti spektra, s katerimi bi lahko ločili dober in slab motor, kar pomeni, da vrednosti med seboj primerjamo (razlika med točnostjo in ločljivostjo) in na ta način uspešno prepoznavali kakovostne črpalke od nekakovostnih.

Da bi potrdili zgornje trditve, smo meritve opravili ponovno s specialno, laboratorijsko sledljivo merilno opremo ter šestim vzorcev črpalk izmerili RMS nivo zvočnega tlaka – Tabela 6 (slika 50). RMS je okrajšava za "Root Means Square"; z njo je podana povprečna moč nivoja zvočnega tlaka.

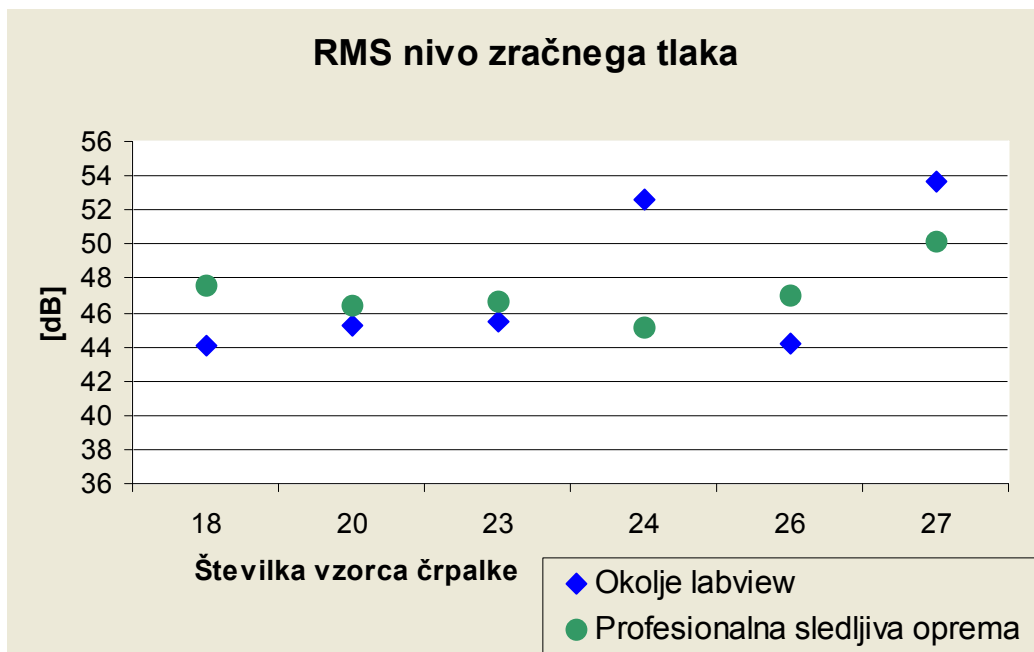
Razlike v izmerjenih vrednostih so nastale v največji meri zaradi razlik v:

- smerni karakteristiki mikrofona (kota zajemanja zvoka),
- frekvenčni karakteristiki mikrofona,
- temperaturi merjenja ter
- različnih velikostih in izvedbi gluhe komore.

Meritve z identično gluho komoro niso bile izvedljive, zaradi različnih lokacij merilnih aparatov, s katerimi so meritve opravljali.

RMS nivo zvočnega tlaka [dB]		
Št. vz. črpalke	V okolju Labview	Z laboratorijsko sledljivo merilno opremo
18	44,1	47,6
20	45,2	46,4
23	45,5	46,6
24	52,6	45,1
26	44,2	47,0
27	53,7	50,2

Tabela 6: Prikaz razlik izmerjenih vrednosti



Slika 50: Grafični prikaz razlik izmerjenih vrednosti

7.6. Potek merjenja

V okolju Labview smo naredili program, ki iz mikrofonskega vhoda zajema signal in ga pretvori v časovni potek tlaka (Pa) ter jakost zvočnega spektra (dB).

S programom je možno zajemati signal iz zvočne kartice ali uporabiti že vnaprej shranjeni signal iz predvajalnika v formatu »wav«, kar nam omogoča preučevanje že posnetega signala izven proizvodne linije.

Merjenje je potekalo tako, da smo 15 krat zajeli 500 ms dolg interval zvoka motorja (črpalke) ter na koncu dobili povprečno vrednost RMS signala po frekvenčnem spektru. Na ta način smo še dodatno zmanjšali vpliv okolice, saj je hrup iz okolice vsaj v določenih primerih naključen, kar pomeni, da na končno povprečno vrednost nima večjega vpliva.

Za 15-kratno merjenje 500 ms dolgega intervala smo se odločili predvsem iz praktičnega vidika, saj smo vseh 50 vzorcev črpalk tudi poslušati ter tako pridobili praktične izkušnje med slišnim zaznavanjem in grafičnim prikazom zajetega signala. Izbrali bi lahko tudi krajši časovni interval, saj ta nima posebnega vpliva na ločevanje dobre in slabe črpalke, vendar bi krajši čas onemogočal vizualno spremljanje časovnega poteka signala. Časovni prikaz 500 ms dolgega intervala ima še eno prednost, okolje Labview ga namreč prikaže v dovolj visoki ločljivosti, da ga merilec lahko opazuje.

Na podlagi 50 meritev vzorčnih črpalk, katere smo predhodno poslušali ter predvidevali, da za našega kupca niso preglasne, smo določili mejne jakosti na časovnem poteku signala ter na celotnem frekvenčnem področju od 20 Hz do 12,5 kHz. Človeško uho lahko zazna frekvence tudi do 20 kHz, vendar smo s preizkušanjem ugotovili, da se frekvenčni spekter črpalk od frekvence 10 kHz dalje ne razlikuje do te mere, da bi ga bilo smiselno meriti.

Če je katera od empirično postavljenih mejnih vrednosti časovnega signala ali frekvenčnega spektra prekoračena, nam program ob zaključenem merjenju vizualno sporoči, da je črpalka slaba. Nove črpalke so lahko precej glasne, saj večino proizvedenega hrupa povzroča štartna podložka, ki je še neutečena. Neutečena štartna podložka proizvaja šum v frekvenčnem območju od 2,2 kHz do 4,9 kHz, kar se odraža na povečani vrednosti RMS signala v tem delu frekvenčnega spektra. To pomeni, da nam podatek o vrednosti RMS signala ne predstavlja pomembnega pokazatelja o kakovosti črpalke, kajti kakovostna črpalka ima lahko v nekaterih primeri celo večjo vrednost RMS signala, kakor črpalka z napako. Še sprejemljive vrednosti šuma v frekvenčnem območju pa so prikazane v Tabeli 7.

Mejne vrednosti časovnega signala in frekvenčnega spektra smo skozi potek meritev spreminjali ter tako po 50 premerjenih črpalkah določili mejne vrednosti. Merjena črpalka, katere šum ne presega teh mejnih vrednosti, je ustrezne kakovosti (priloge).

Izmerjene RMS vrednosti samega šuma merilne opreme:

Šum zvočne kartice brez priklopljenega mikrofona znaša 24,6 dB.

S kakovostnim tonskim kablom dolžine 5,5 m se jakost šuma zviša na 31,5 dB.

Tonski kabel smo skrajšali na dolžino 3 m in dobili jakost šuma 30,3 dB, ob priključenem mikrofону se jakost šuma v zaprti zvočni komori zviša na 38,6 dB.

Tabela izmerjenih RMS vrednosti hrupa 50 vzorcev črpalk P12:

Št.	Jakost [dB]	Št.	Jakost [dB]	Št.	Jakost [dB]	Št.	Jakost [dB]	Št.	Jakost [dB]
1.	45,12	11.	50,32	21.	46,37	31.	45,37	41.	49,46
2.	48,72	12.	51,23*	22.	45,63	32.	48,02	42.	48,65
3.	46,66	13.	49,50	23.	45,52	33.	48,98	43.	49,30
4.	45,24	14.	49,83	24.	52,58	34.	47,21	44.	48,33
5.	46,10	15.	55,92*	25.	52,80	35.	47,99	45.	42,67
6.	49,86	16.	49,07	26.	44,17	36.	43,72	46.	46,28
7.	48,71	17.	57,42*	27.	53,69	37.	43,45	47.	44,93
8.	43,51	18.	44,10	28.	45,87	38.	46,93	48.	53,44
9.	57,98*	19.	53,17	29.	49,40	39.	46,66	49.	52,38
10.	48,92	20.	45,17	30.	49,42	40.	56,93	50.	49,26

* v analizo (glej: 7.7 Analiza neustreznih črpalk)

Tabela 7: RMS vrednosti izmerjenih črpalk

Analiza rezultatov (dobljeni rezultati neustreznih črpalk, ki smo jih analizirali v sekciji 7.7, niso zajeti v analizi):

Minimalna izmerjena vrednost šuma: 42,67 dB

Maksimalna izmerjena vrednost šuma: 56,93 dB

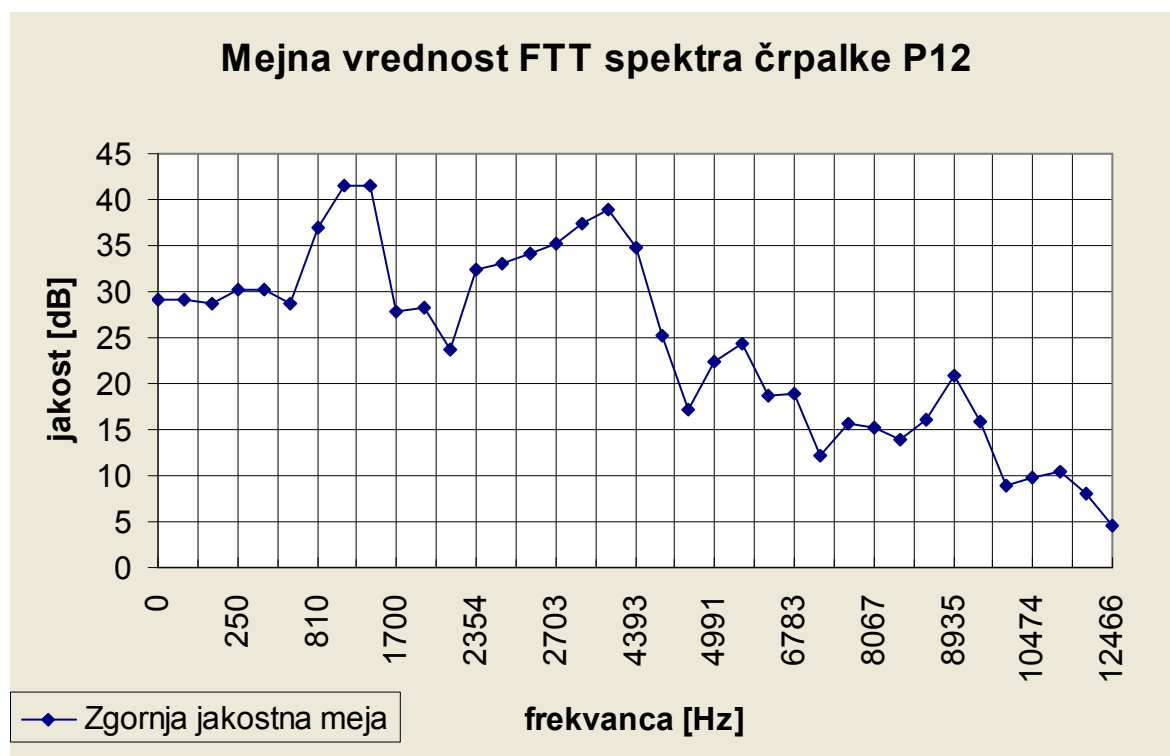
Povprečna vrednost šuma izmerjenih črpalk: 48,04 dB

Standardna deviacija znaša: $\pm 3,16$ dB

Tabela zgornje tolerančne meje šuma po frekvenčnem spektru za črpalko P12:

f [Hz]	Jakost [dB]	f [Hz]	Jakost [dB]	f [Hz]	Jakost [dB]
0	29,13	2,356 k	33,04	7,681 k	15,72
50	29,04	2,494 k	34,19	8,067 k	15,2
140	28,72	2,703 k	35,21	8,278 k	13,98
250	30,2	3,1 k	37,44	8,6 k	16,06
400	30,2	3,871 k	39	8,935 k	20,87
565	28,68	4,393 k	34,87	9,582 k	15,82
810	36,9	4,767 k	25,21	9,868 k	8,93
1 k	41,42	4,893 k	17,17	10,474 k	9,74
1,45 k	41,51	4,991 k	22,31	11,36 k	10,4
1,7 k	27,93	5,325 k	24,38	11,977 k	8
2 k	28,36	5,693 k	18,72	12,466 k	4,5
2,2 k	23,8	6,783 k	18,91		
2,354	32,36	7,283 k	12,16		

Tabela 8: Mejne vrednosti šuma po frekvenčnem spektru

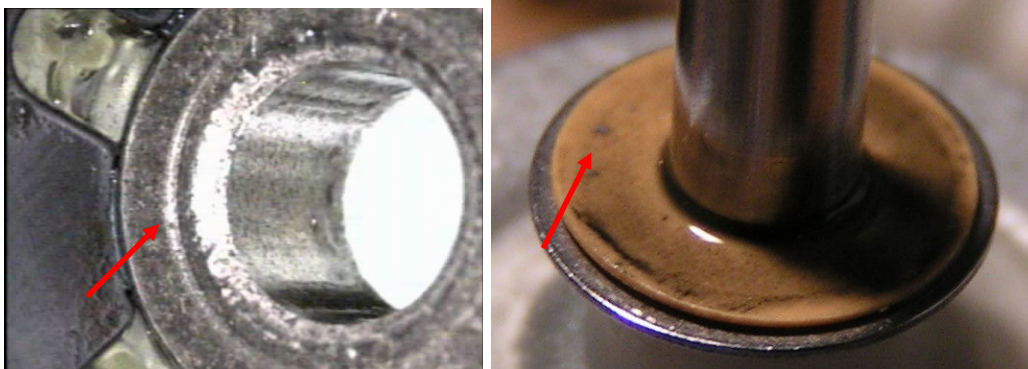


Slika 51: Mejna vrednost FTT spektra črpalke P12

7.7. Analiza neustreznih črpalk

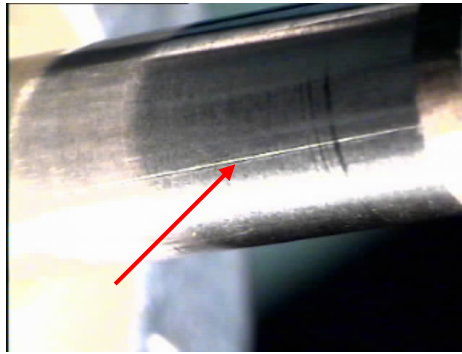
Pri meritvah 50 vzorčnih črpalk smo s pomočjo programa izločili 4 črpalke, za katere smo predvidevali, da so neustrezne (prikaz meritev je v prilogi). Da bi to trditev potrdili, je bilo potrebno črpalke in njene sestavne dele podrobno pregledati. Vseh 50 črpalk je bilo namenjenih izključno za uporabo v tem diplomskem delu, zato neustreznih črpalke ne smemo pripisovati slabi oz. površni izdelavi, ampak izključno raziskovalnemu delu, saj smo z nekaterimi črpalkami nepravilno rokovali ter tako zagotovili večji odstotek nekakovostnih črpalk.

Na sliki 52 (levo) sinter ležaja črpalke št. 9, vidimo sledi trdega delca, kovinskega opilka, ki se je prilepil na naoljeno štartno podložko in proizvajal šum.



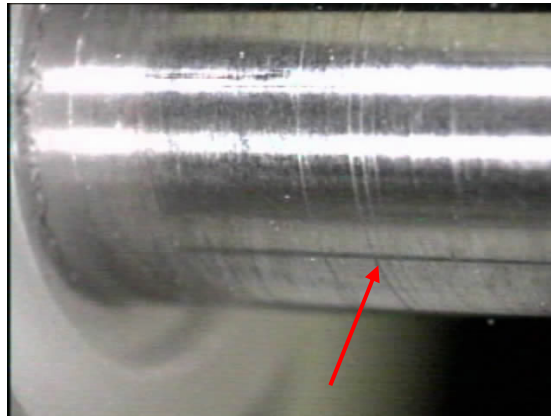
Slika 52: Poškodbe na ležajnem jarmu (levo),
kovinski opilek na štartni podložki (desno)

Slika 53 nam prikazuje razo na gredi – črpalka št. 12. Raza je posledica slabega vhodnega materiala – gredi. V postopku plastificiranja se gred, če njen konec ni kakovostno pobrušen, lahko poškoduje. Poškodba gredi se zgodi, v trenutku ko orodje - puša, ki pri plastificiranju tesni in centrira gred glede na rotorski paket, zadane ob slabo pobrušen konec gredi ter z ostankom materiala potuje po gredi.



Slika 53: Raza na gredi

V ležajnem jarmu črpalke št. 15 s povečanim šumom smo ob pregledu opazili nečistoče. Nečistoče v ležajnem jarmu proizvajajo šum in puščajo na gredeh značilne krožne raze – slika 54.



Slika 54: Raze, ki so posledica umazanije v sinter ležaju

Tudi na štartni podložki črpalke št. 17 je bil kovinski delec, ki sicer ni poškodoval jarma, vendar je bil dovolj velik, ki je povzročil neustrezno zvočno sliko (slika 55).



Slika 55: Kovinski opilek na štartni podložki

8. SKLEPNE UGOTOVITVE

Za zadovoljstvo kupcev je potrebno zagotoviti proizvodnjo izdelkov in storitev s čim manj napakami. To lahko zagotovimo z ustrezno končno kontrolo, ki bi morebitne napake na končnem proizvodu lahko zaznale. Vrhunska kakovost ob sprejemljivi ceni zadovoljuje kupca, kar pa zahteva neprekinjen razvoj, optimizacija sistemov, inovacije, itd., kakor tudi stalno seznanjanje vseh zaposlenih z dosežki tehnologije in novimi spoznanji na področju izboljšanja kakovosti.

Na podlagi zvočne slike črpalke P12 lahko z ustrezno nastavljenimi mejnimi vrednostmi zvočnega signala in njegovega frekvenčnega spektra, ločimo ustrezne asinhronske motorje od neustreznih. Domnevamo, da lahko z ustreznimi prilagoditvami ta način ločevanja uporabimo tudi za druge izdelke, ki pri svojem delovanju proizvajajo zvok, pod pogojem, da pri zaznavanju ni večjih zunanjih vplivov. Težave z ločevanjem šuma iz okolice so še toliko bolj pereče pri merjencih, ki imajo majhne zvočne jakosti, saj je razmerje zvok-šum preprosto premajhno za uspešno obdelavo signala-zvoka.

Vse zgoraj opisane elemente predvidevamo, da bi dosegli z ustrezno predelavo programske opreme, ki bi delovala hitreje, še v večji meri odpravljala motilni hrup iz okolice ter s predelavo montažne linije P12 (prilogi 1), na kateri bi ravno tako morali eliminirati motilni hrup montažne linije in okolice na najmanjšo možno jakost. Tako bi dodatno izboljšali kvaliteto proizvodov in povečali zadovoljstvo kupca.

9. LITERATURA

- [1] Lessons In Electric Circuits -- Volume II - Chapter 13
http://www.ibiblio.org/obp/electricCircuits/AC/AC_13.html#02492.png,
dostopnost preverjena oktobra 2006
- [2] Socket to Me!: How Electricity Came to Be
<http://www.ieee-virtual-museum.org/exhibit/exhibit.php?id=159249&lid=1&seq=7>,
dostopnost preverjena oktobra 2006
- [3] <http://www.eia.doe.gov/kids/history/people/pioneers.html#Tesla>, dostopnost
preverjena oktobra 2006
- [4] Ivan Zagradišnik, Bojan Slemnik: Električni rotacijski stroji,
Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, 2003
- [5] Boštjan Liliija, Elektromotorni pogoni z asinhronskimi motorji. Gradivo dostopno
na internet strani: http://www.s-sc.ce.edus.si/elektro_kemija/Gradiva/skripta-elektromotorni%20pogon%20z%20asinhronskimi%20motorjii.pdf, dostopnost
preverjena oktobra 2006
- [6] Anton Pozne: Električne meritve I.del, FE 1995
- [7] I. Zagradišnik, B. Hribernik, M. Trlep, A. Hamler: Močnostna elektronika in
električni stroji, Analiza in optimiranje asinhronskega motorja z zasenčenimi poli,
Tehniška fakulteta Maribor, 1989
- [8] Reed stikalo: http://en.wikipedia.org/wiki/Reed_switch, dostopnost preverjena
novembra 2006
- [9] Brüel & Kjær, Basic Concepts of Sound, 1998,
literatura je kupljena skupaj z merilno opremo podjetja Brüel & Kjær
in ni v prosti prodaji

- [10] Ravnikar B., Osnove glasbene akustike in informatike, DZS, Ljubljana, 2001
- [11] R. Susnik, J. Sodnik ter S. Tomažič, Proceedings of ACOUSTICS 2005,
članek dostopen na internet strani:
http://www.lkn.fe.uni-lj.si/lknpub/Clanki/2005/Acoustics05_R.pdf, dostopnost
preverjena oktobra 2006
- [12] Absorber - AcoustiGuard™ ML:
http://images.google.si/imgres?imgurl=http://www.wilrep.com/WilrepDataSheets/noisecontrol/absorbersbarrierscomposites/mlboard.gif&imgrefurl=http://www.wilrep.com/WilrepDataSheets/noisecontrol/absorbersbarrierscomposites/AcoustiguardGL/GL.htm&h=320&w=320&sz=47&hl=sl&start=1&tbnid=81T07486435o_M:&tbnh=118&tbnw=118&prev=/images%3Fq%3Dsound%2Babsorber%2Bglass%26svnum%3D10%26hl%3Dsl%26lr%3D%26sa%3DN,
dostopnost preverjena oktobra 2006
- [13] Gradbeništvo Dare Batič s.p.
http://users.volja.net/grad_batic/dileme.htm#izolacija,
dostopnost preverjena oktobra 2006
- [14] Zvočna kartica Creative Audigy 2:
<http://www.creative.com/products/welcome.asp?category=1>,
dostopnost preverjena oktobra 2006
- [15] Trust kondenzatorski mikrofonski MC-1300
<http://www.trust.com/products/product.aspx?artnr=12894>,
dostopnost preverjena novembra 2006
- [16] National Instruments – Labview:
<http://www.ni.com/labview/>, dostopnost preverjena oktobra 2006

- [17] Release note for Sound and Vibration Toolkit 3.1 for Labview
<http://www.ni.com/pdf/manuals/323637b.pdf>, dostopnost preverjena novembra 2006
- [18] Hanning Function
http://docs.dewresearch.com/DspHelp/html/IDH_SignalUtils_Hanning.htm,
dostopnost preverjena novembra 2006
- [19] Marjana Erdelj: FFT analizator
http://193.2.76.29/dps_arhiv/seminarske/erdelji/Idel.htm,
dostopnost preverjena novembra 2006
- [20] Benko Uroš, Odkrivanje napak v kolektorskem motorju na podlagi analize hrupa, diplomsko delo univerzitetnega študija, FE, Ljubljana, 2002
- [21] Brüel & Kjær, Basic Frequency Analysis of Sound, 1998,
literatura je kupljena skupaj z merilno opremo podjetja Brüel & Kjær
in ni v prosti prodaji

PRILOGE

Priloga 1: Prikaz proizvodne linije črpalke tipa P12:

- delovna postaja 1: vstavljanje rotorja s podloškama, avtomatsko oljenje podložk (slika: delovna postaja 1a), vstavljanje ležajnega jarma na zadnjo stran rotorja, statorja na paleto ter vstavljanje ležajnega jarma na zgornjo stran rotorja (slika :delovna postaja 1b),
- delovna postaja 2: avtomatsko natiskavanje razpršilne podložke,
- delovna postaja 3: nameščanje ohišja črpalke,
- delovna postaja 4: vstavljanje pokrova črpalke in tekača,
- delovna postaja 5: vstavljanje plavača in Reed stikala,
- delovna postaja 6: 100% kontrola črpalke,
- delovno mesto 7: pakiranje črpalk.



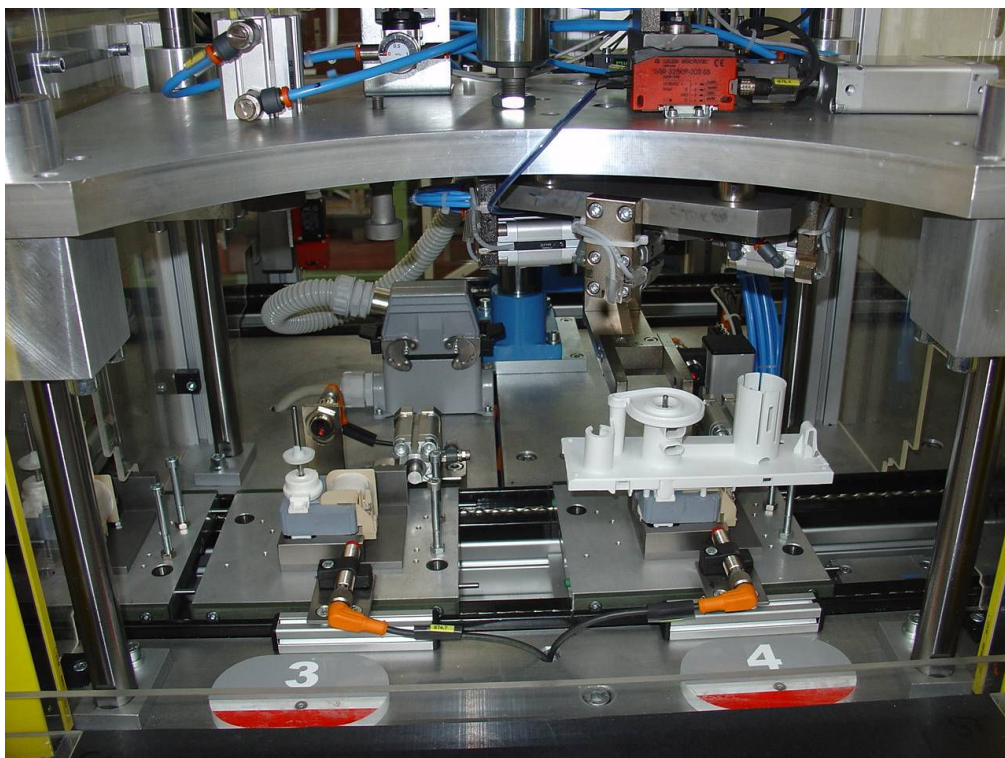
Delovna postaja 1a



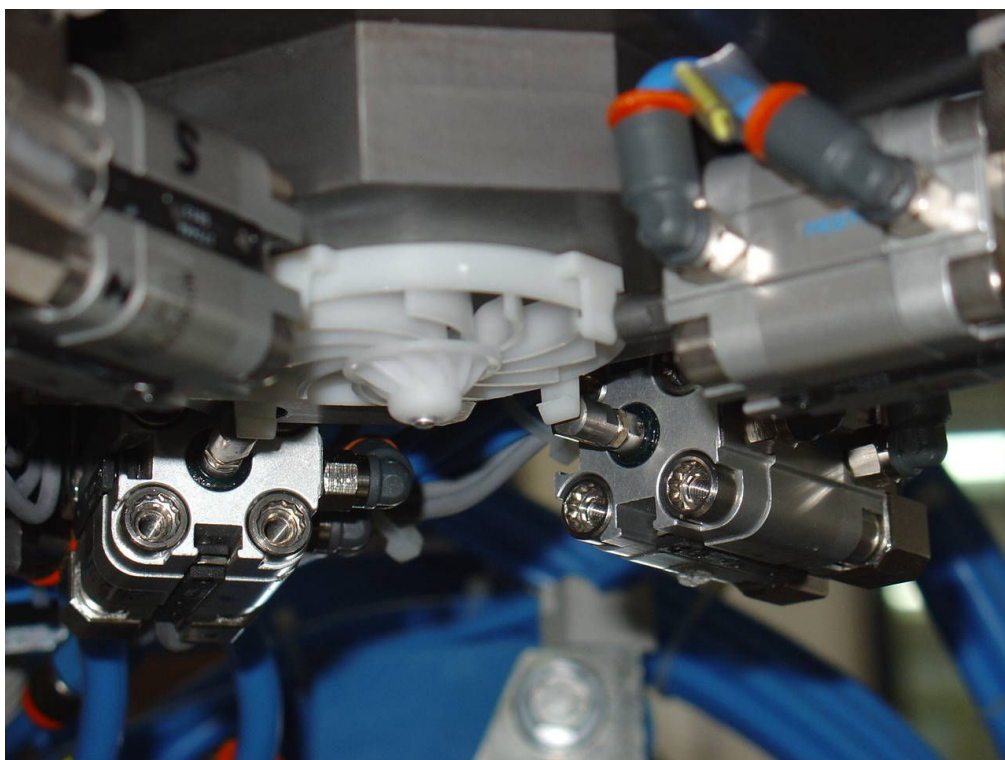
Delovna postaja 1b



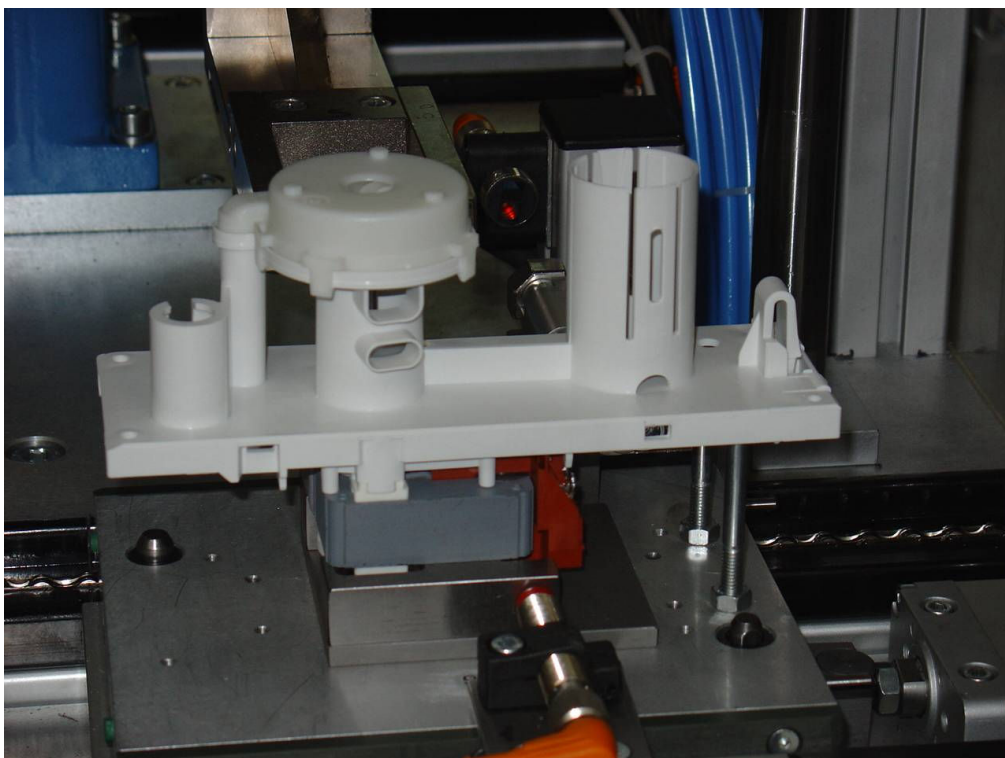
Delovna postaja 2



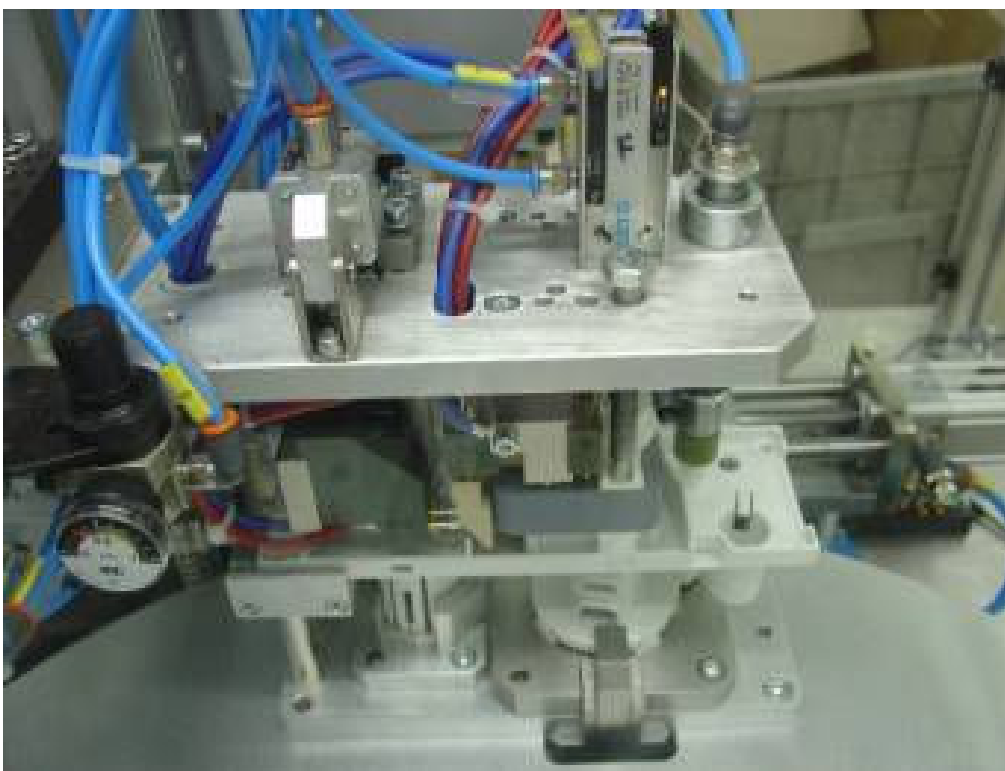
Delovna postaja 3



Delovna postaja 4



Delovna postaja 5

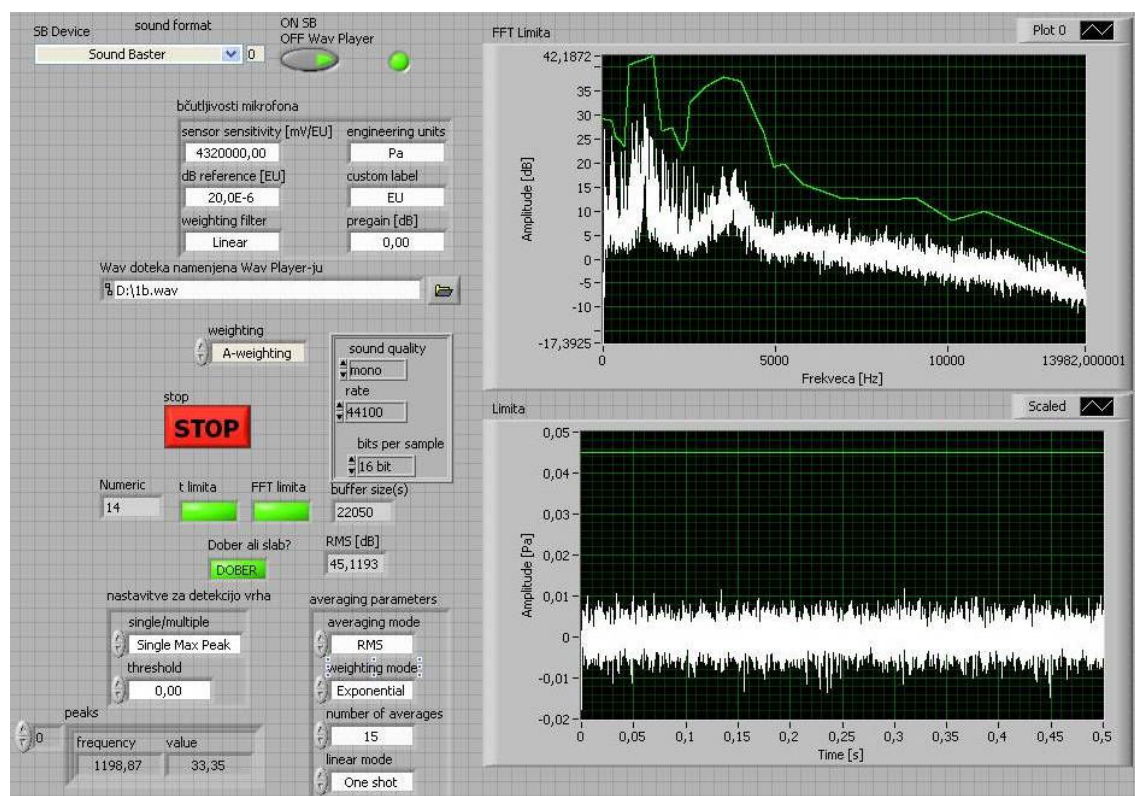


Delovna postaja 6

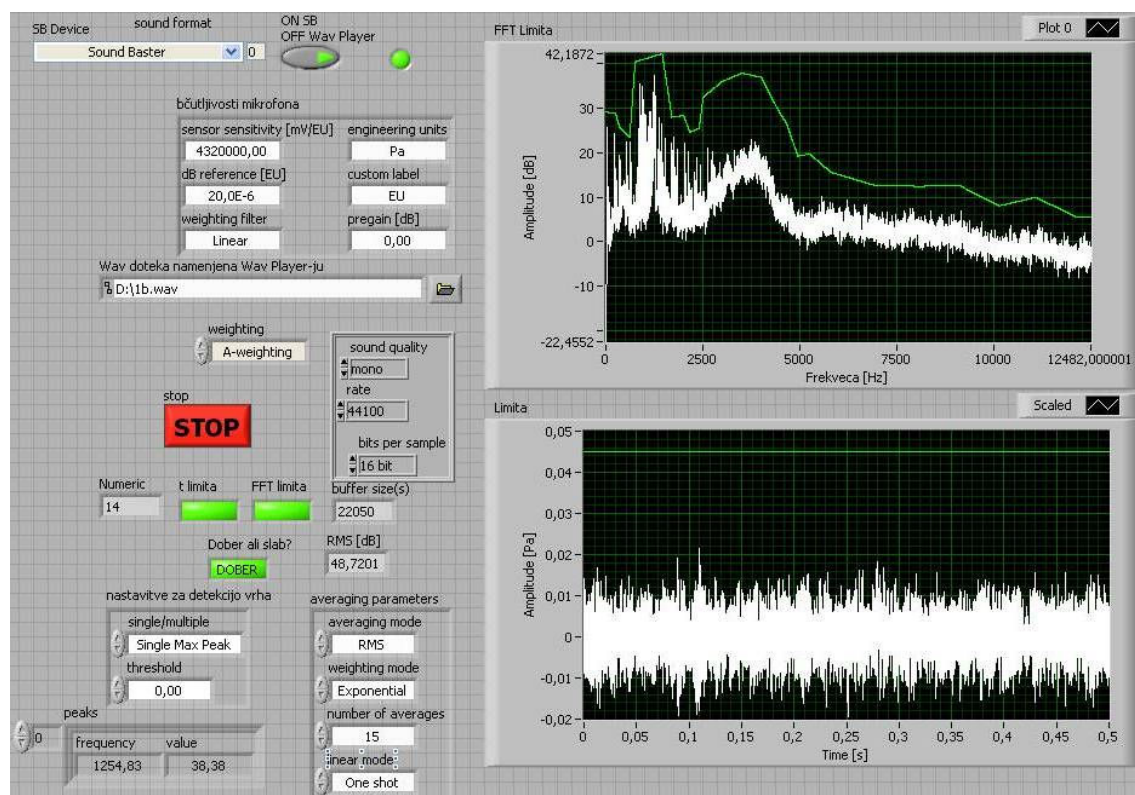
Priloga 2: Prikaz 50ih meritev črpalk v okolju Labview.

Na slikah priloge 2 se vidi grafični prikaz zvoka po preteku vsake meritve vzorčne črpalke. Z zeleno barvo so določene mejne vrednosti časovnega ter frekvenčnega spektra (FFT), bele barva pa prikazuje vrednosti signala.

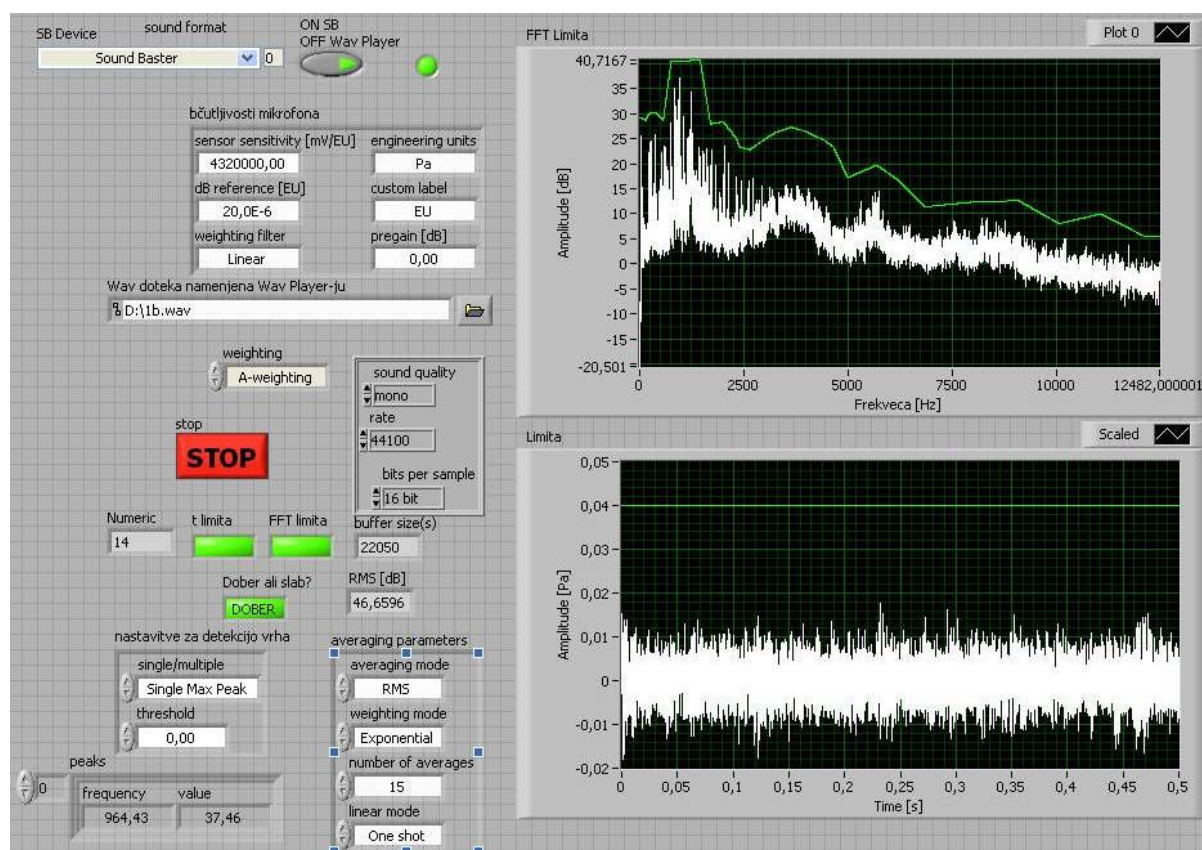
Kadar vrednost spektra prekorači mejne vrednosti, nam na zaslonu zagori rdeča kontrolna lučka ter nam tako signalizira nekakovostno črpalko (črpalke št. 9, 12, 15 ter 17). Na zaslonu se prikazuje še vrednost »peak« (jakost frekvence z najvišjo amplitudo) in RMS vrednost frekvenčnega spektra (FFT). V prilogi 2 opazimo tudi spremembe med mejnimi vrednostmi merjenih črpalk. Ta sprememba je še najbolj opazna pri merjeni črpalki št. 1 in zadnji pomejeni črpalki št. 50. Mejne vrednosti smo skozi meritve, na podlagi izpisanega signala in slušnega zaznavanja, minimalno prilagajali s tem pa dosegli, da smo mejne vrednosti čimbolj prilagodili povprečni zvočni sliki merjene črpalke tipa P12.



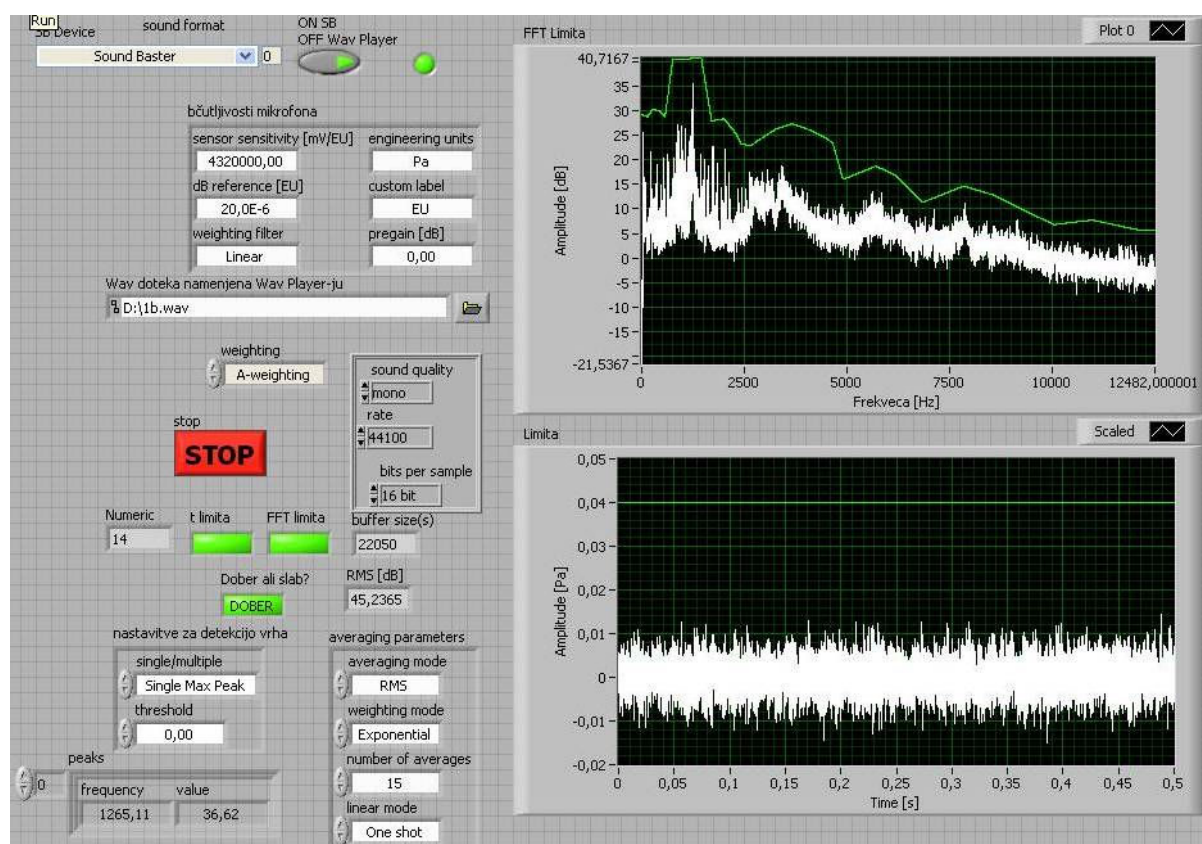
Črpalka št.1



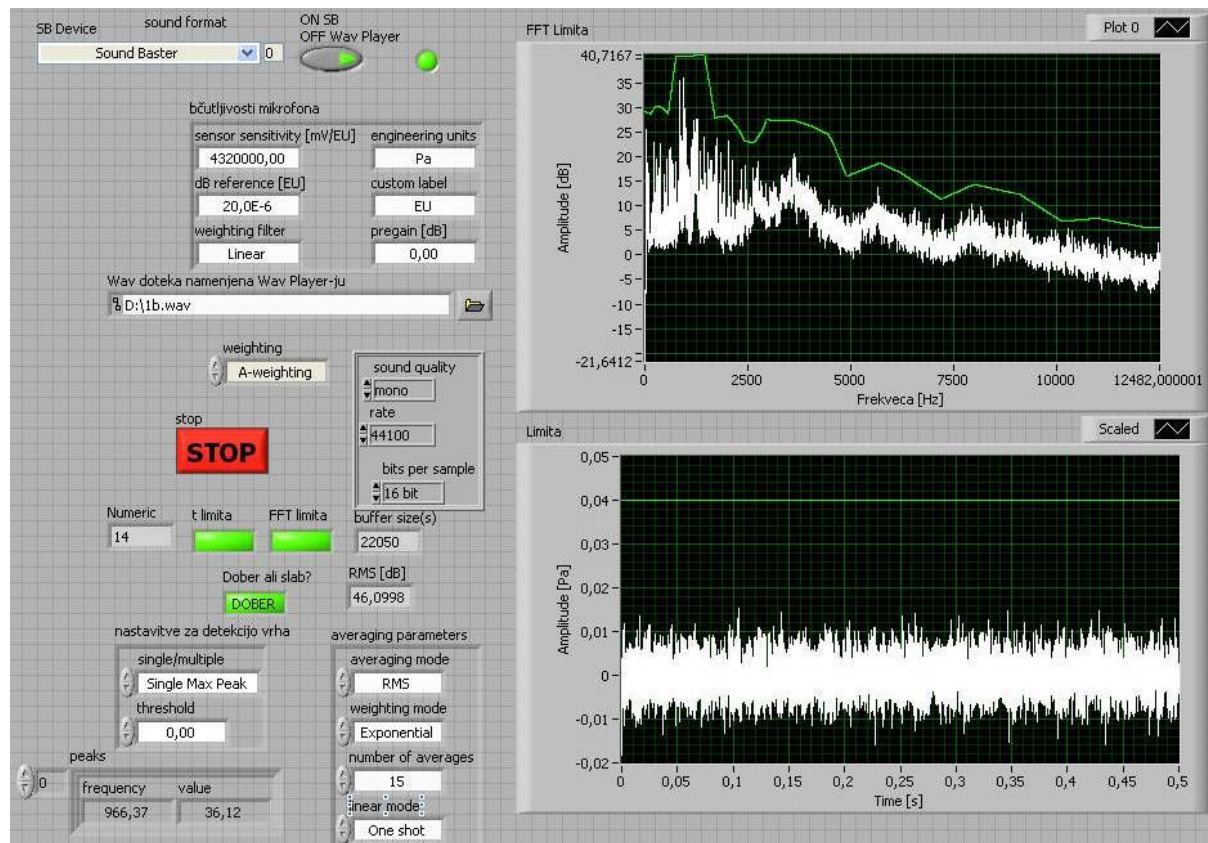
Črpalka št.2



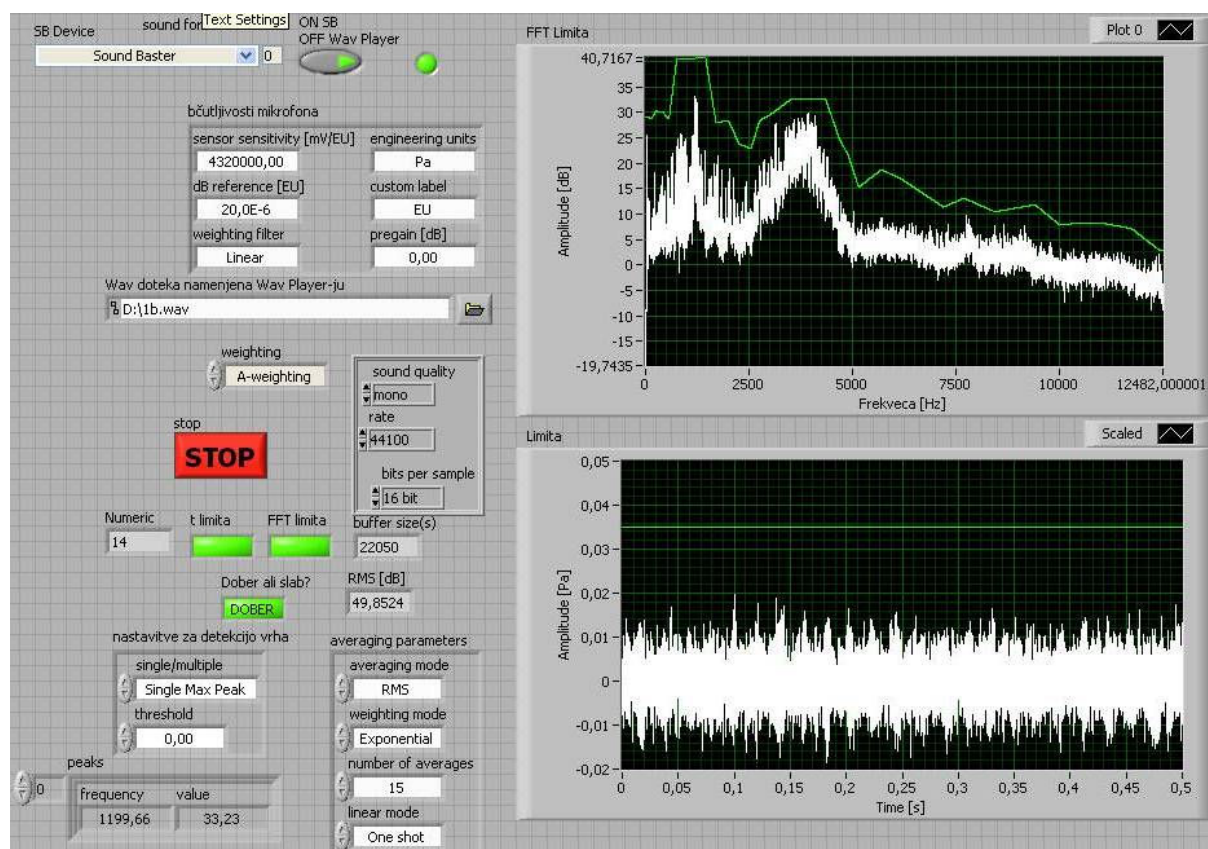
Črpalka št.3



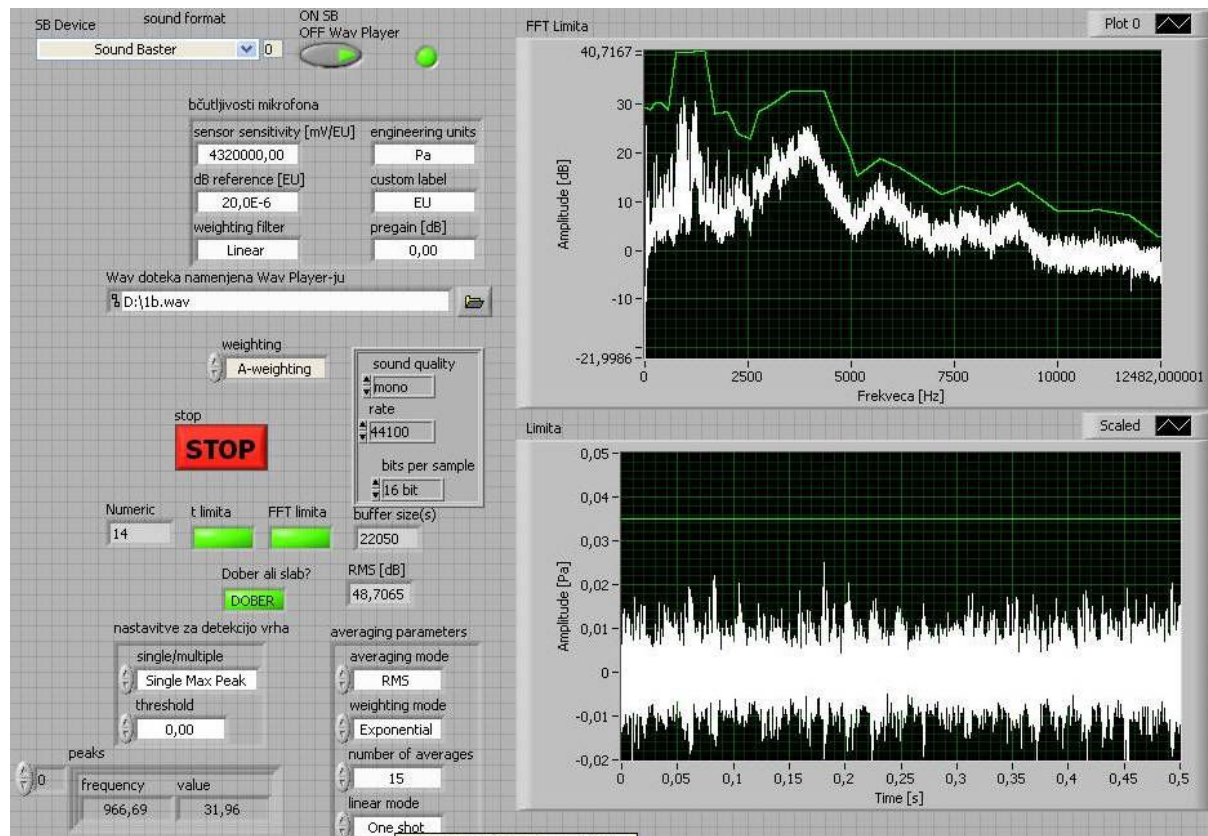
Črpalka št.4



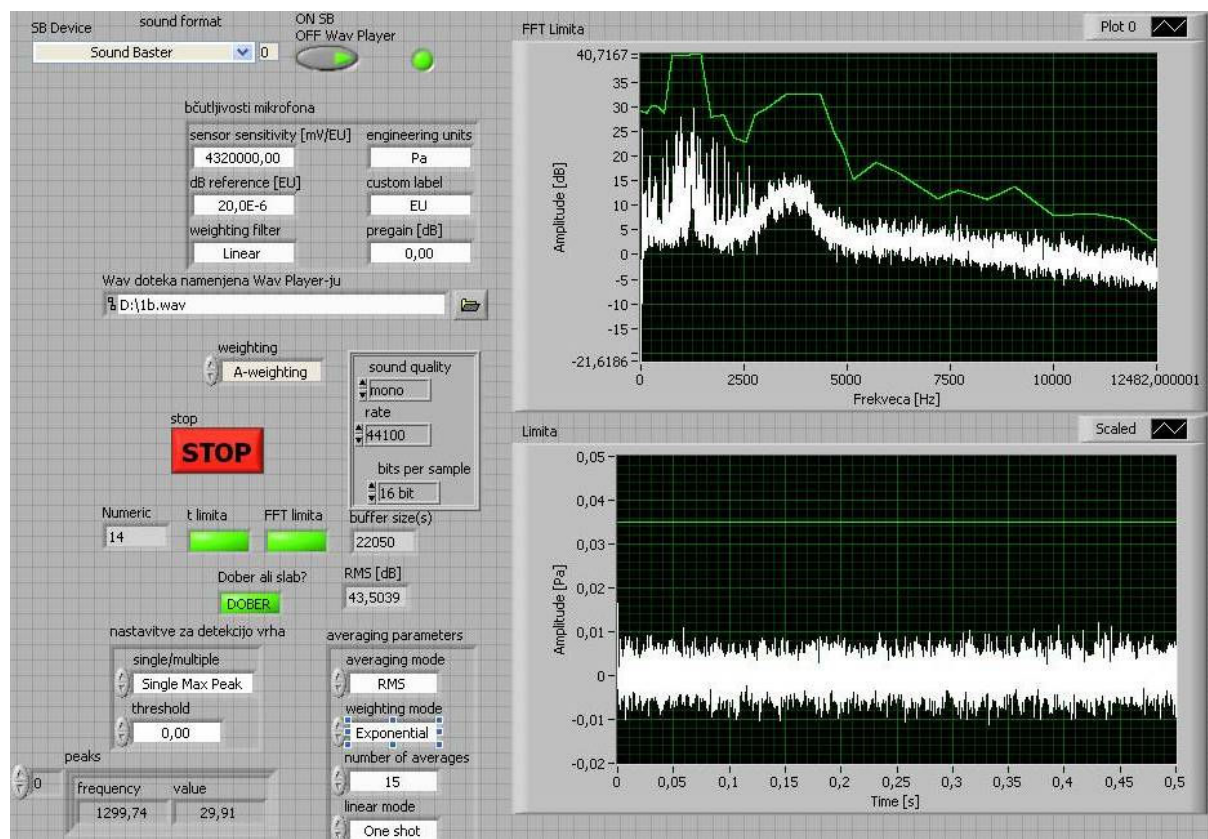
Črpalka št.5



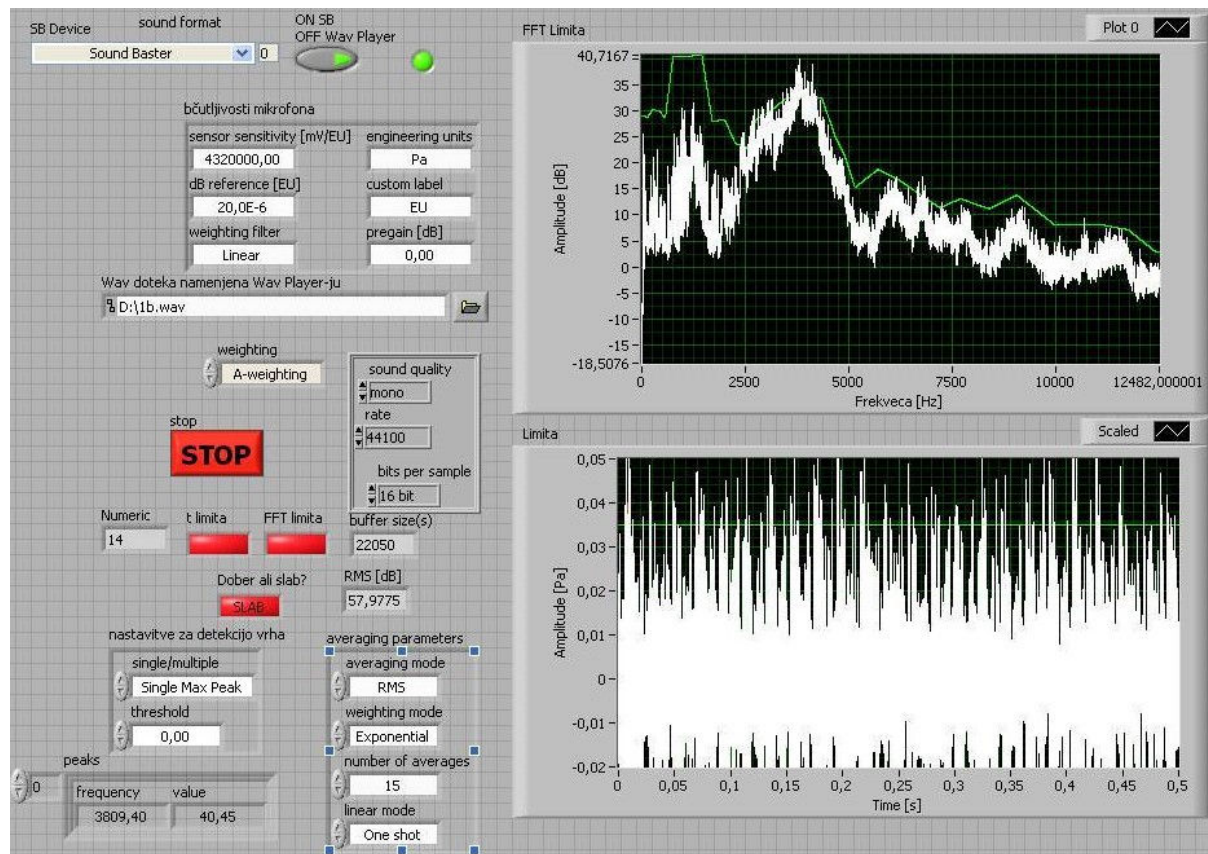
Črpalka št.6



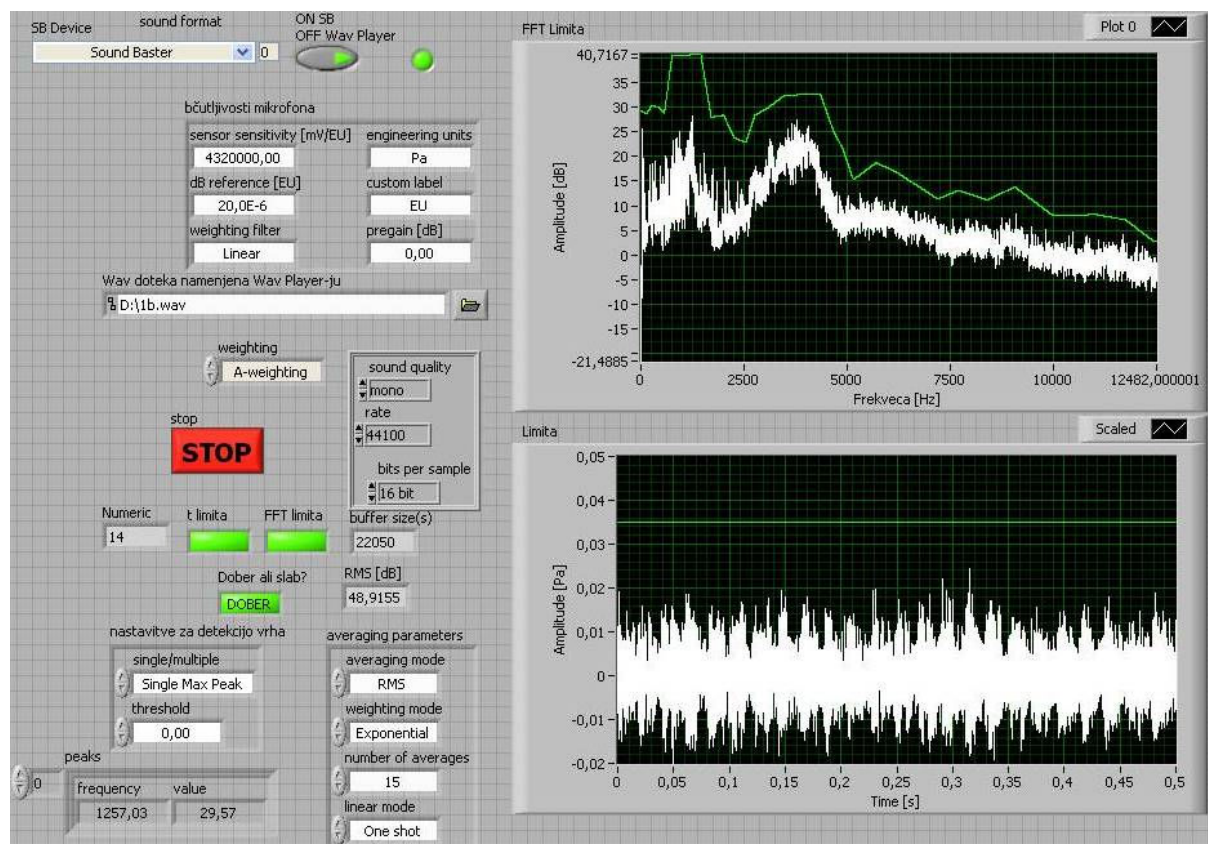
Črpalka št.7



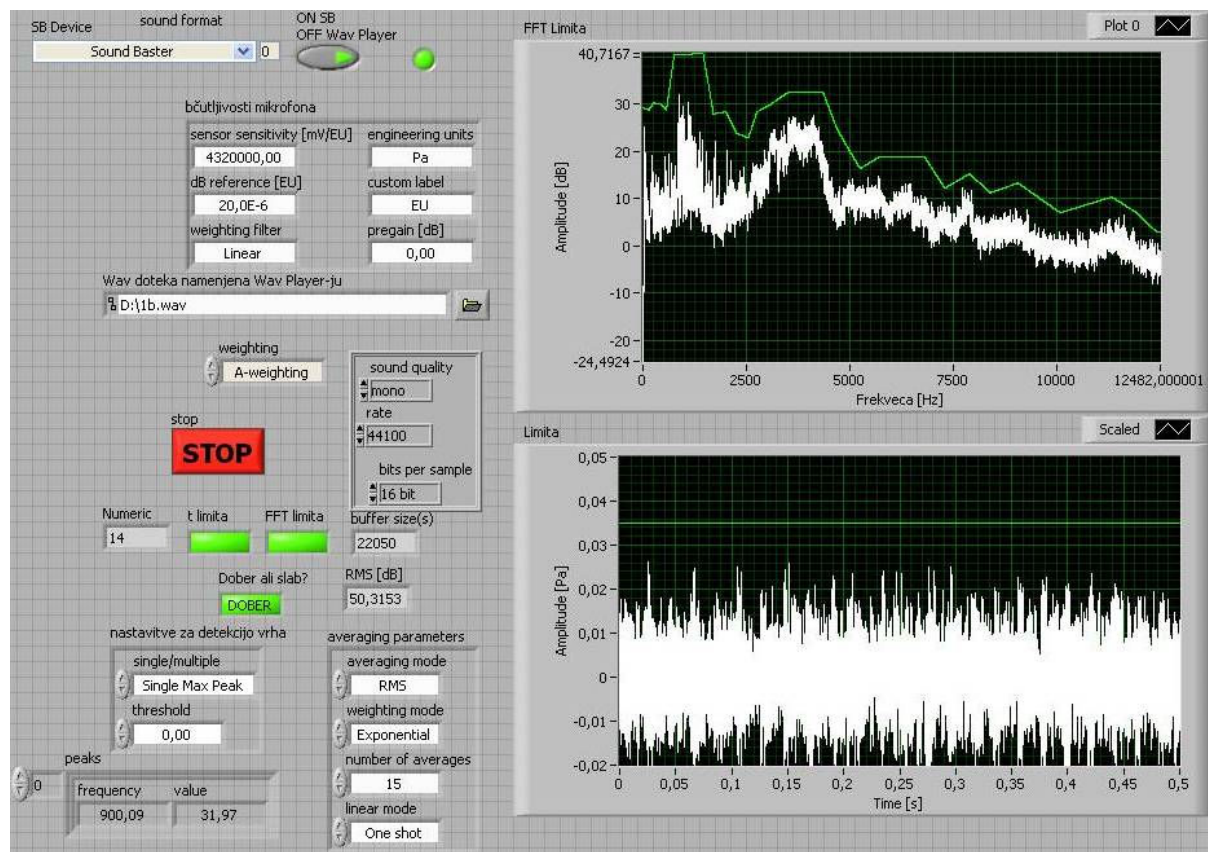
Črpalka št.8



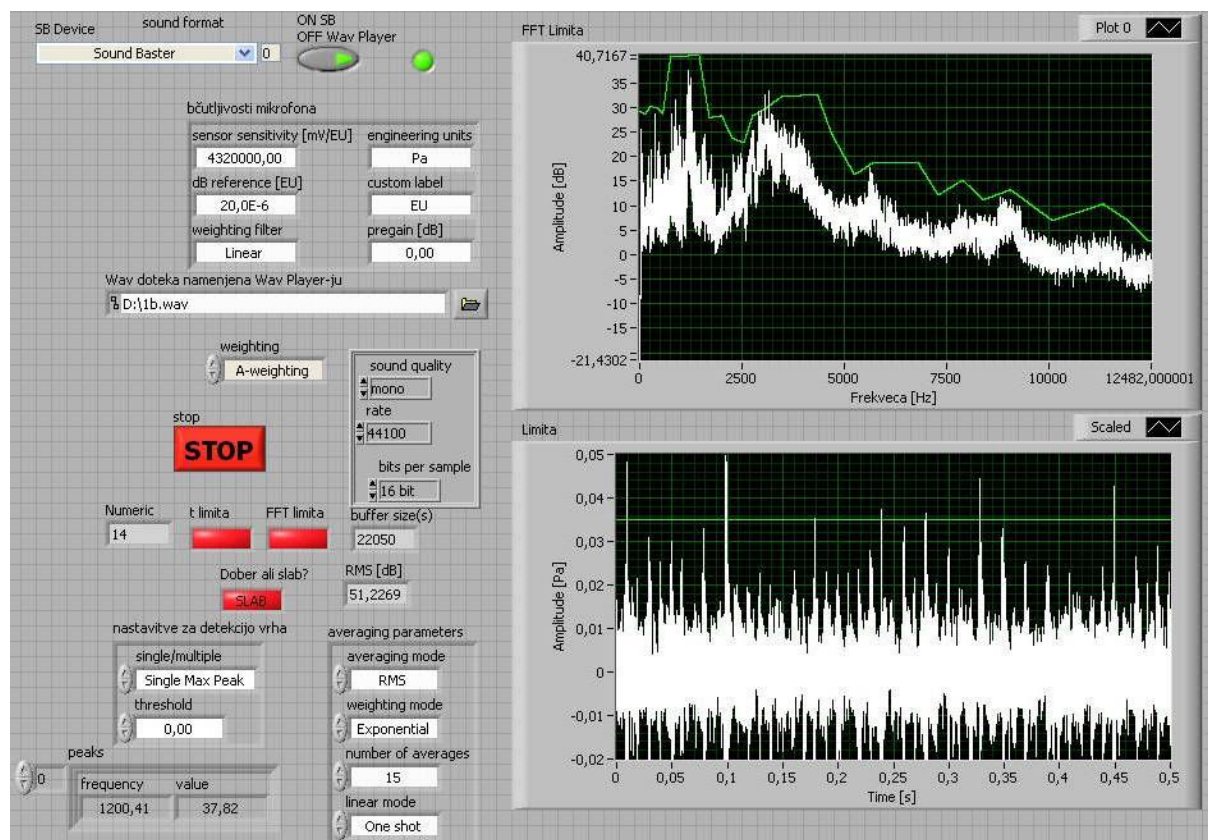
Črpalka št.9



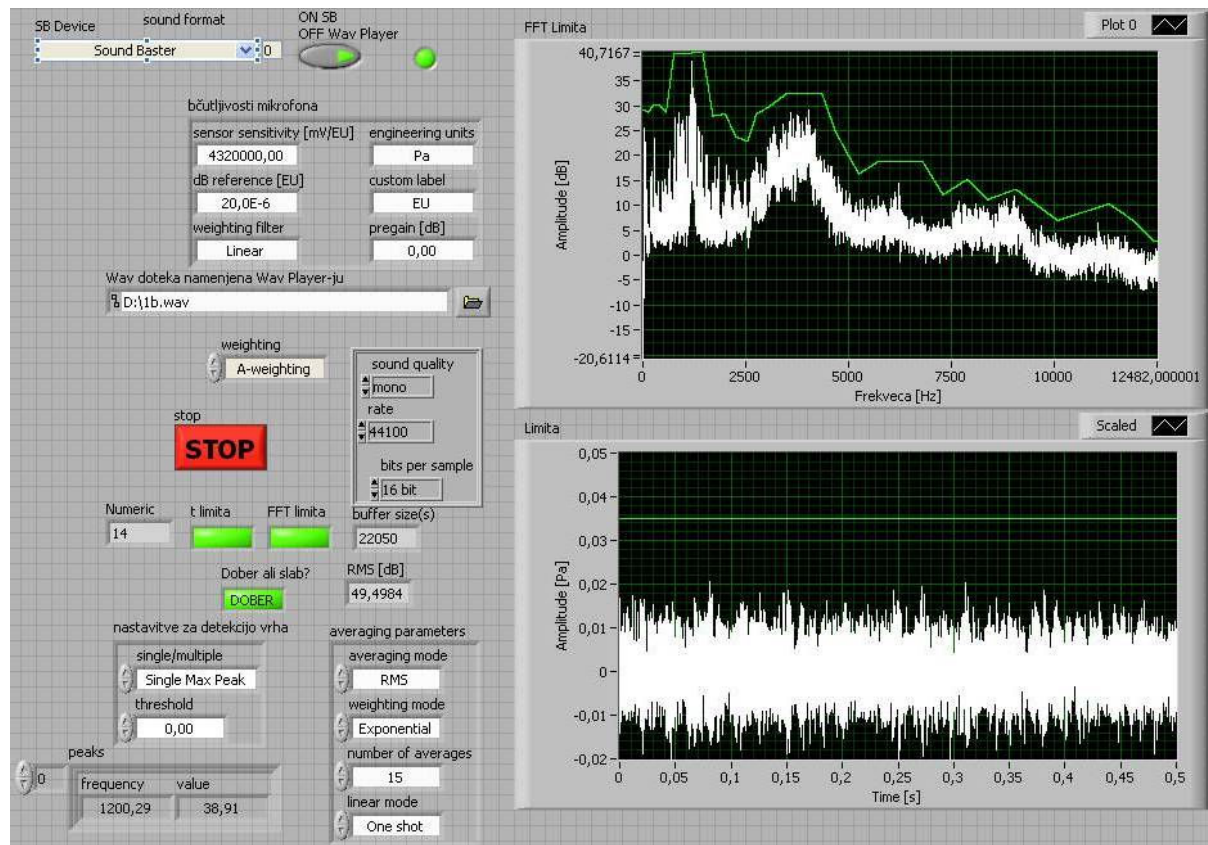
Črpalka št.10



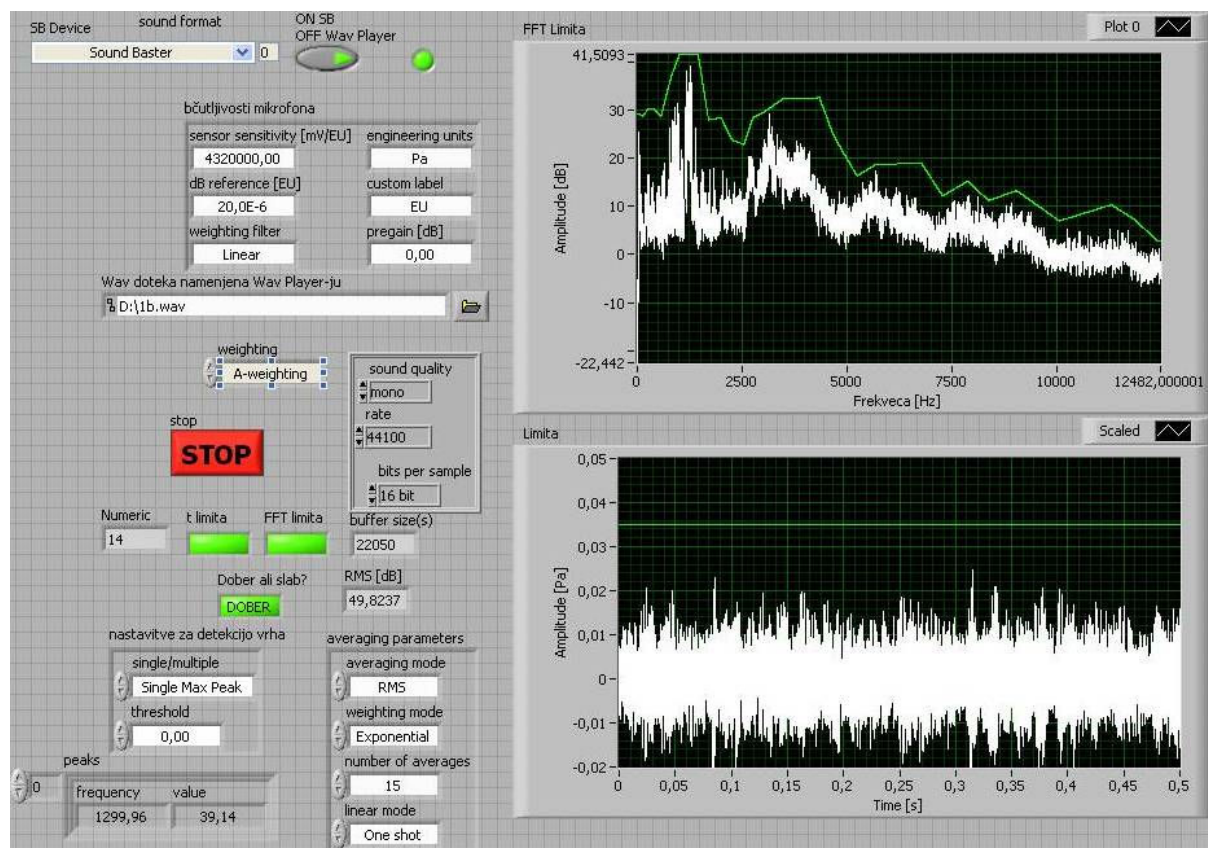
Črpalka št.11



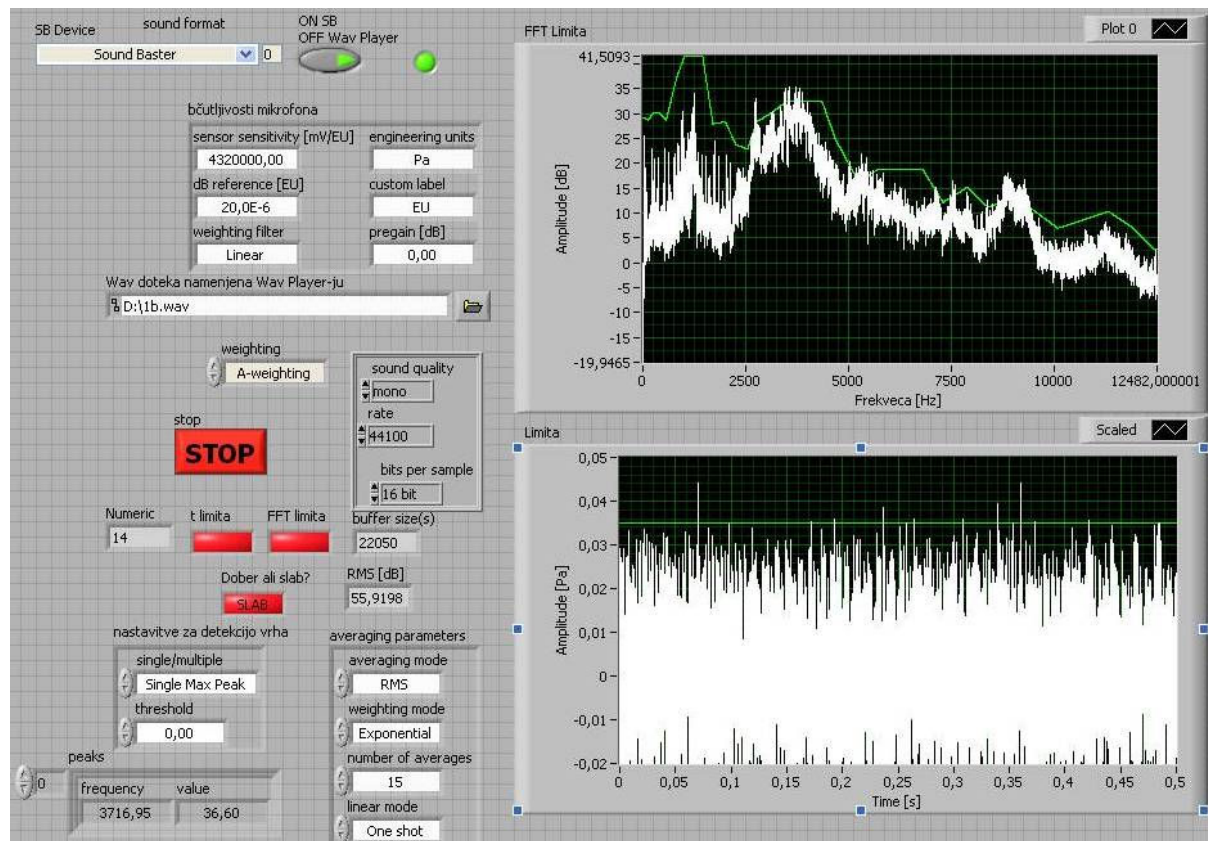
Črpalka št.12



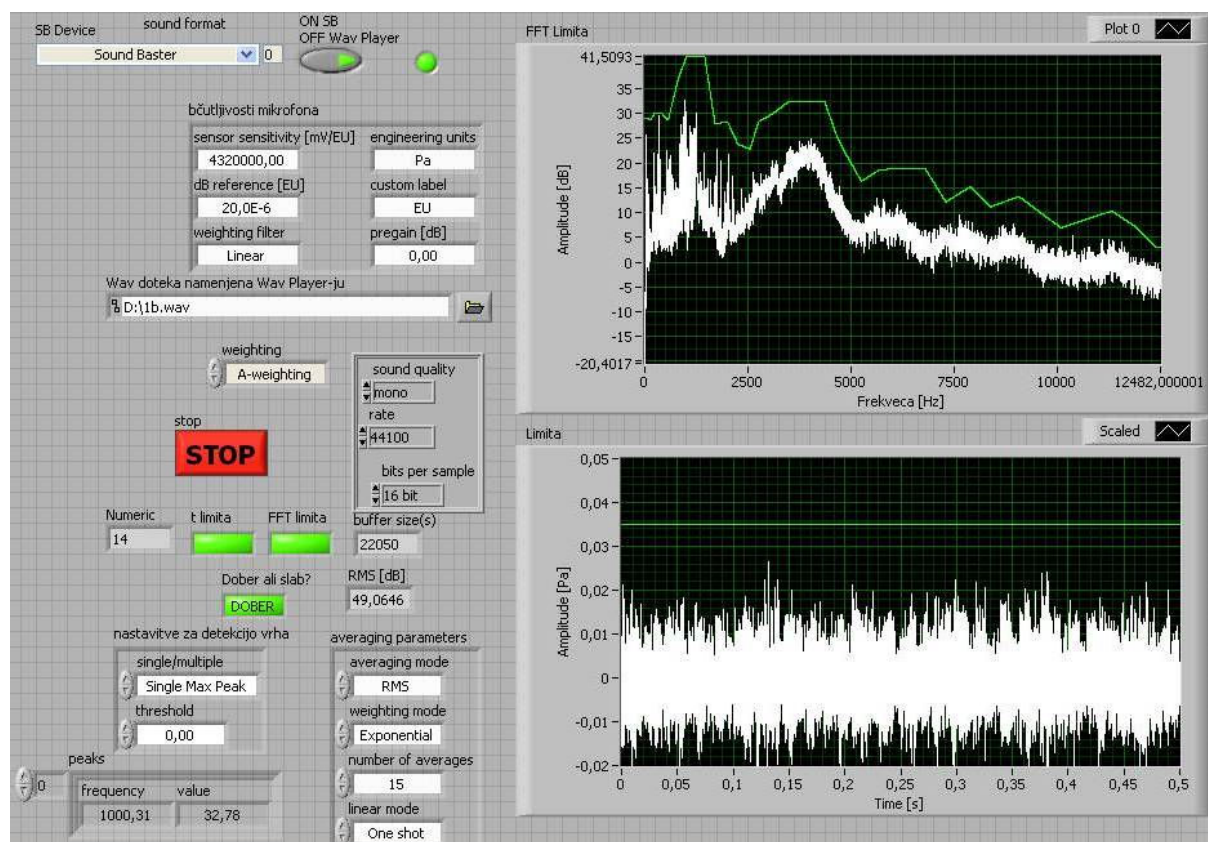
Črpalka št.13



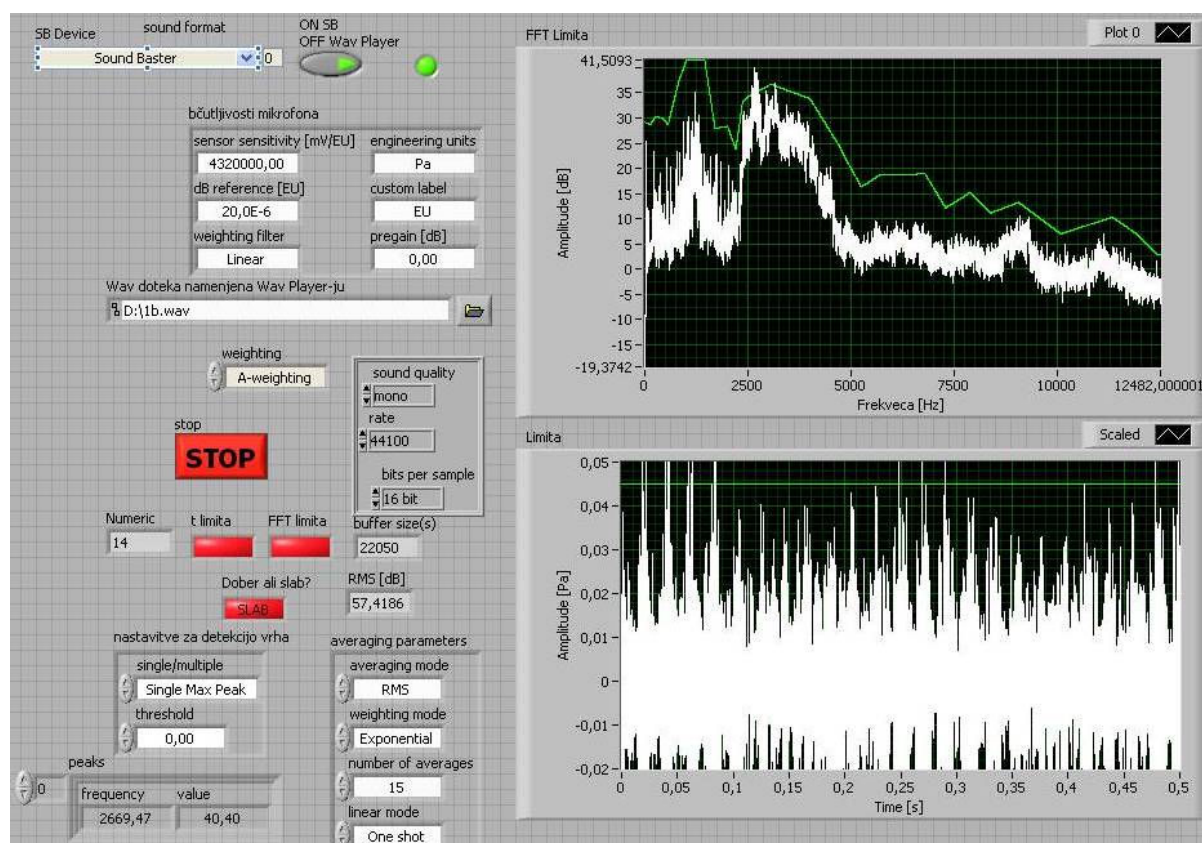
Črpalka št.14



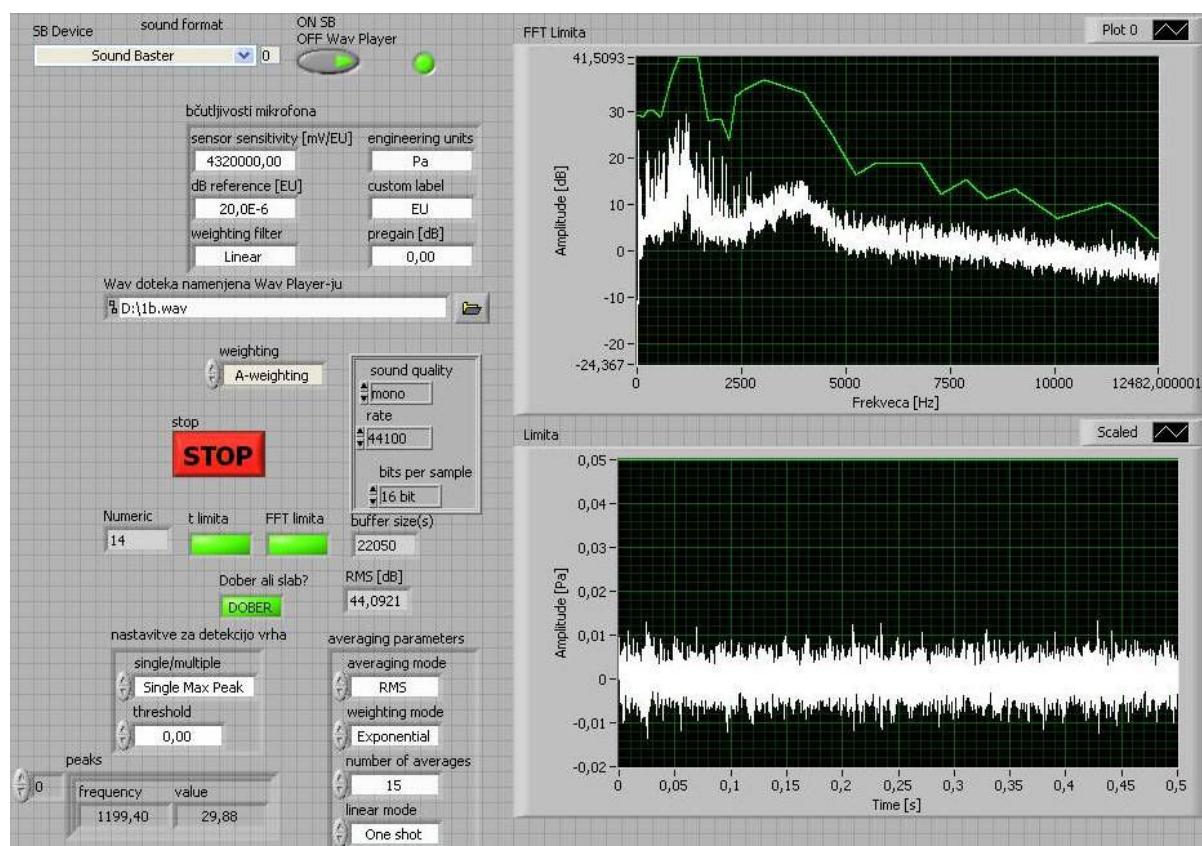
Črpalka št.15



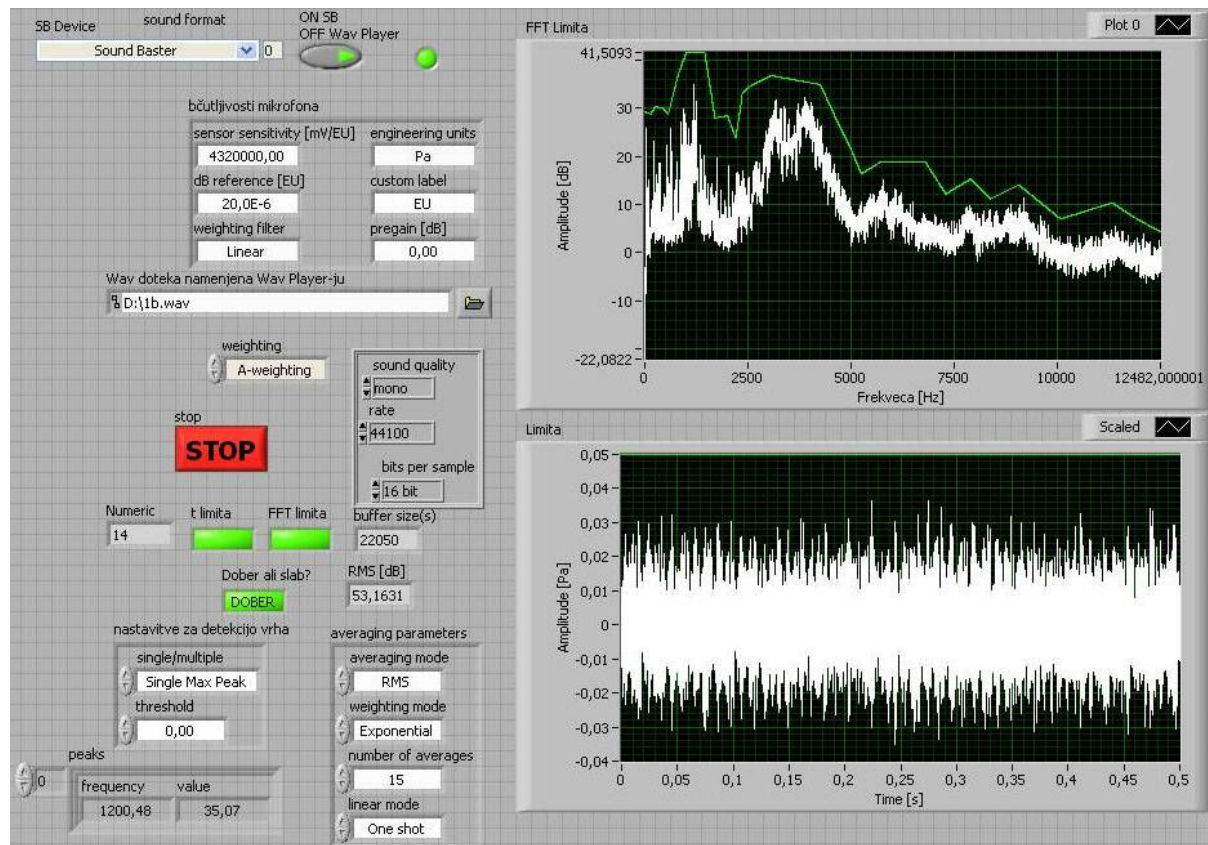
Črpalka št.16



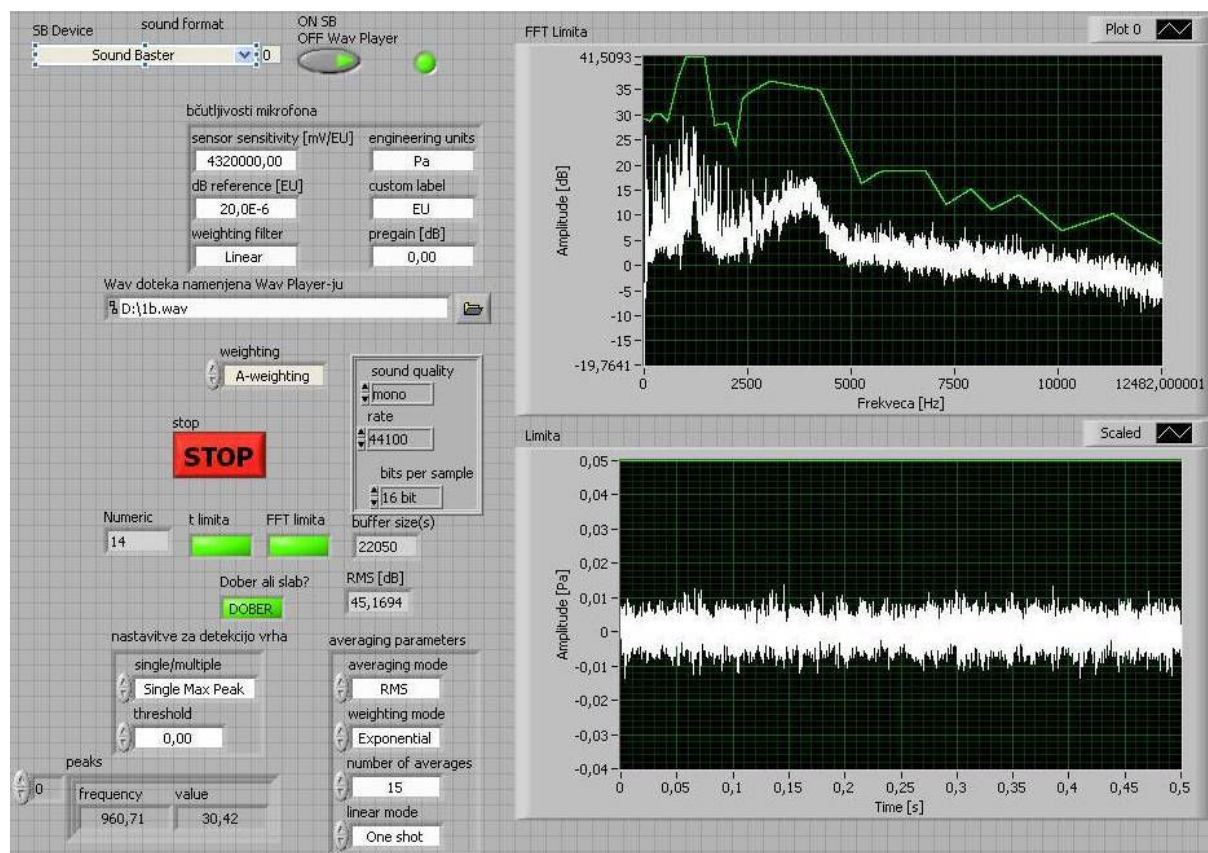
Črpalka št.17

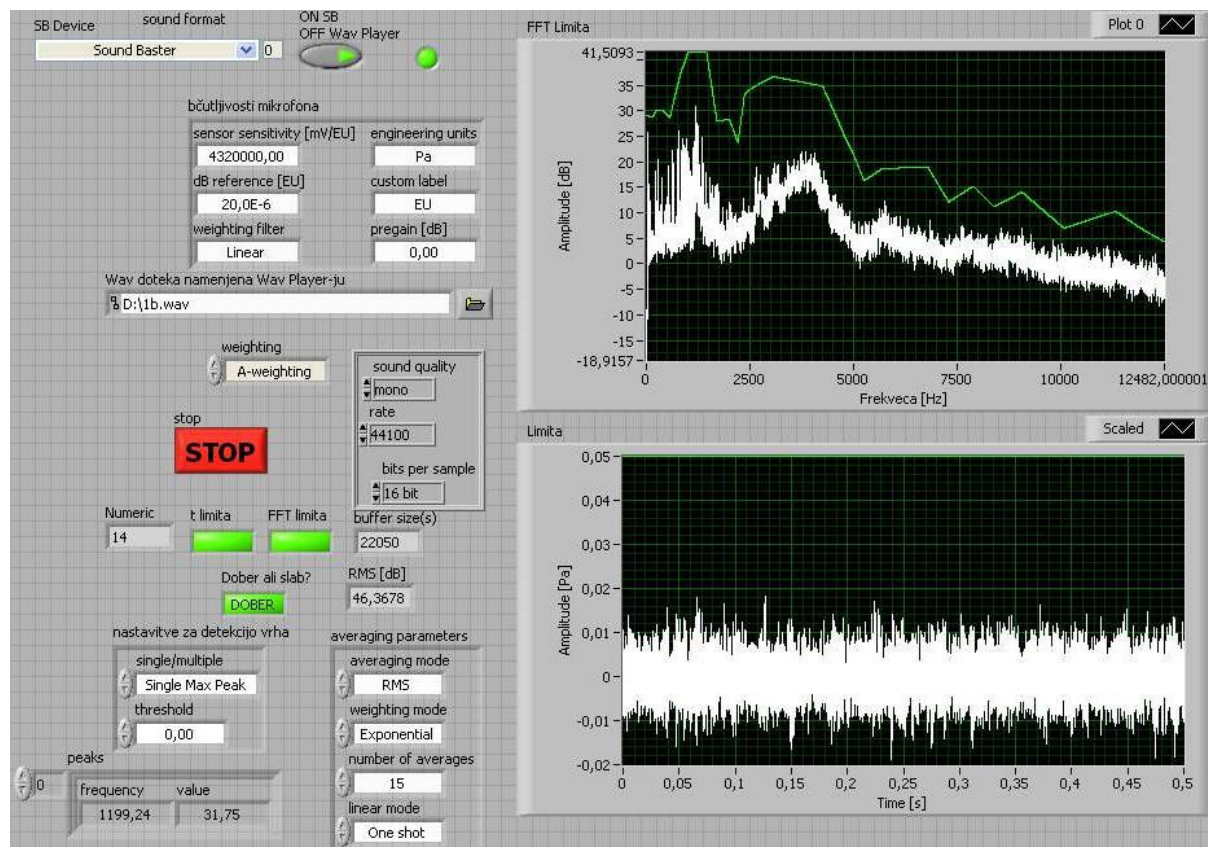


Črpalka št.18

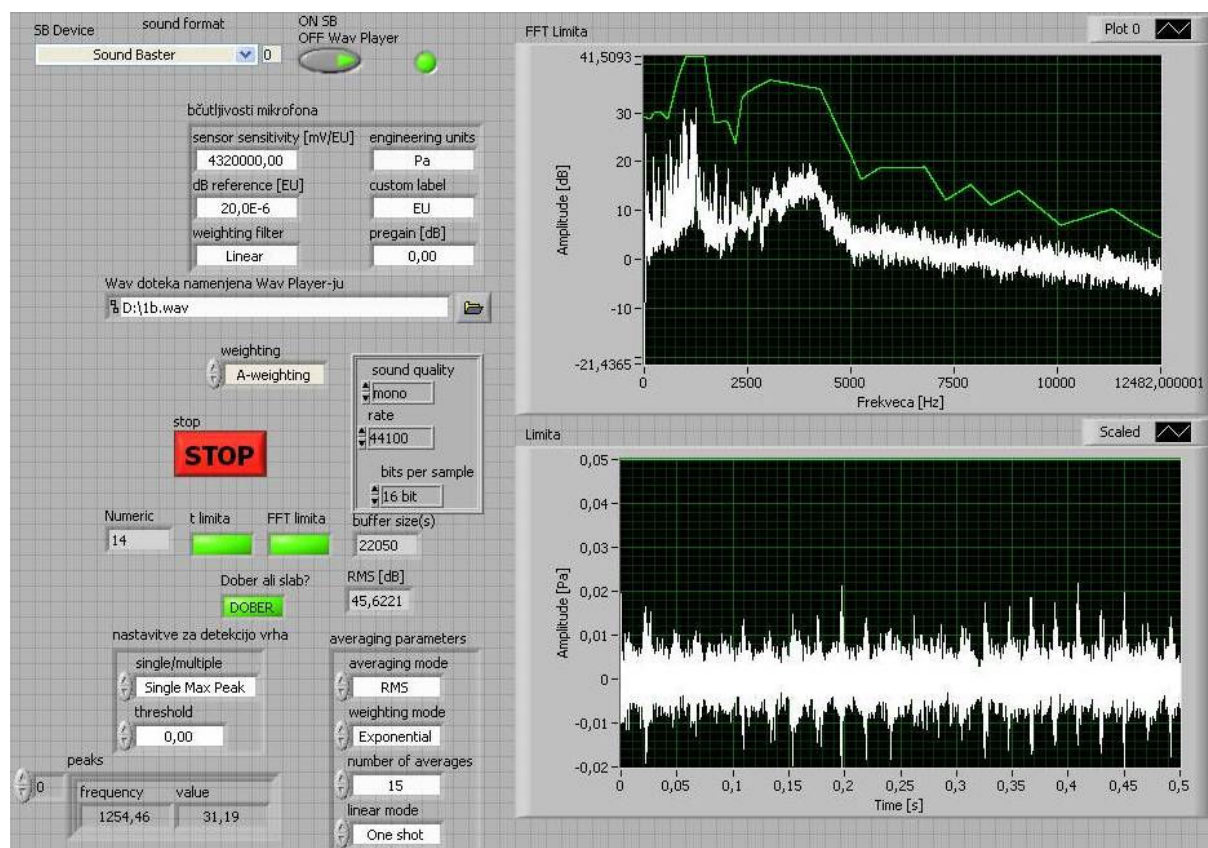


Črpalka št.19

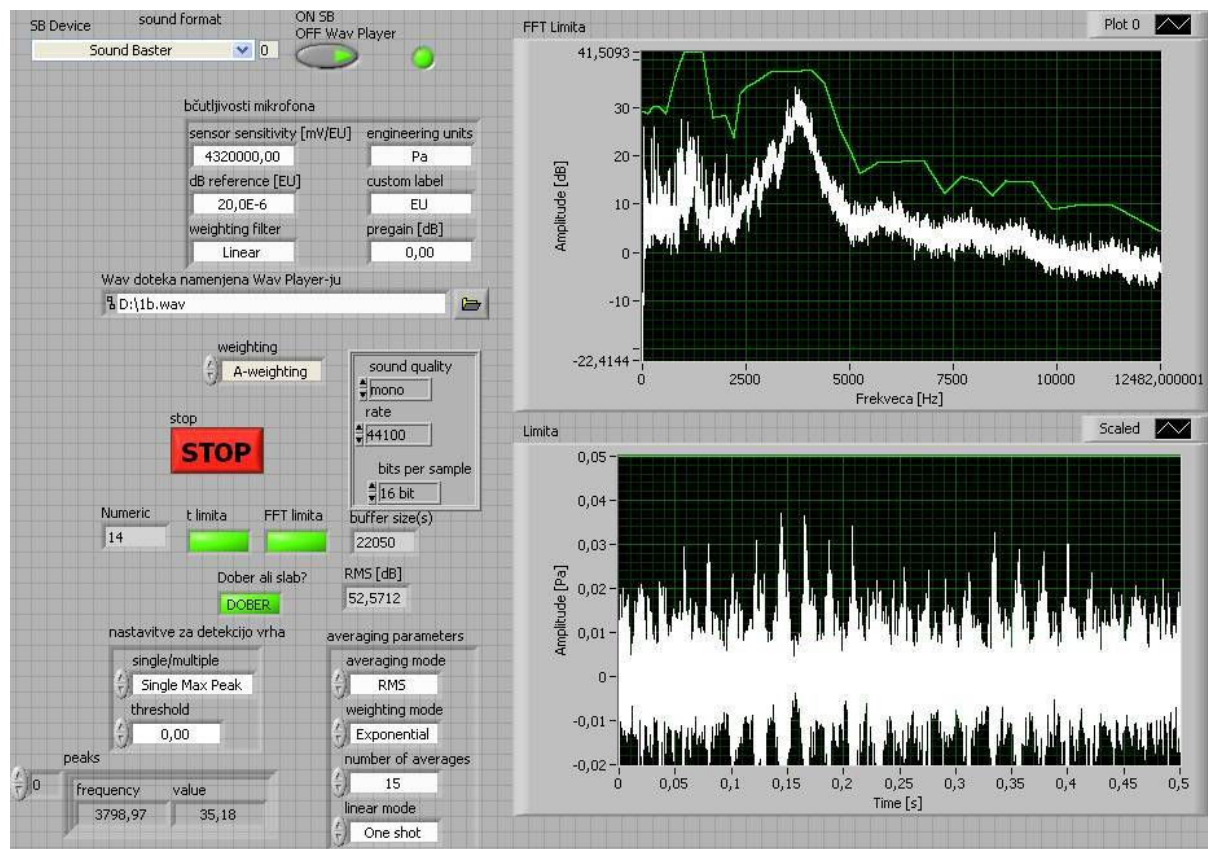




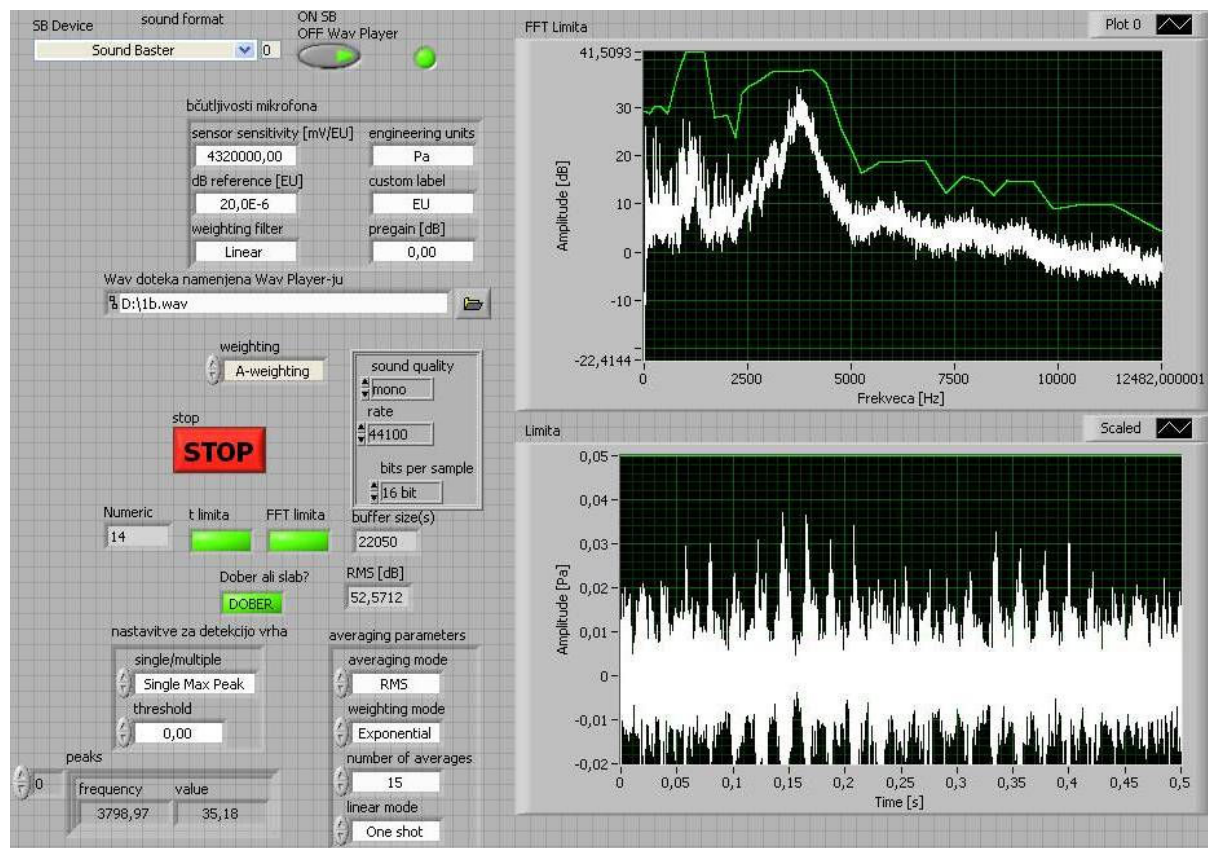
Črpalka št.21



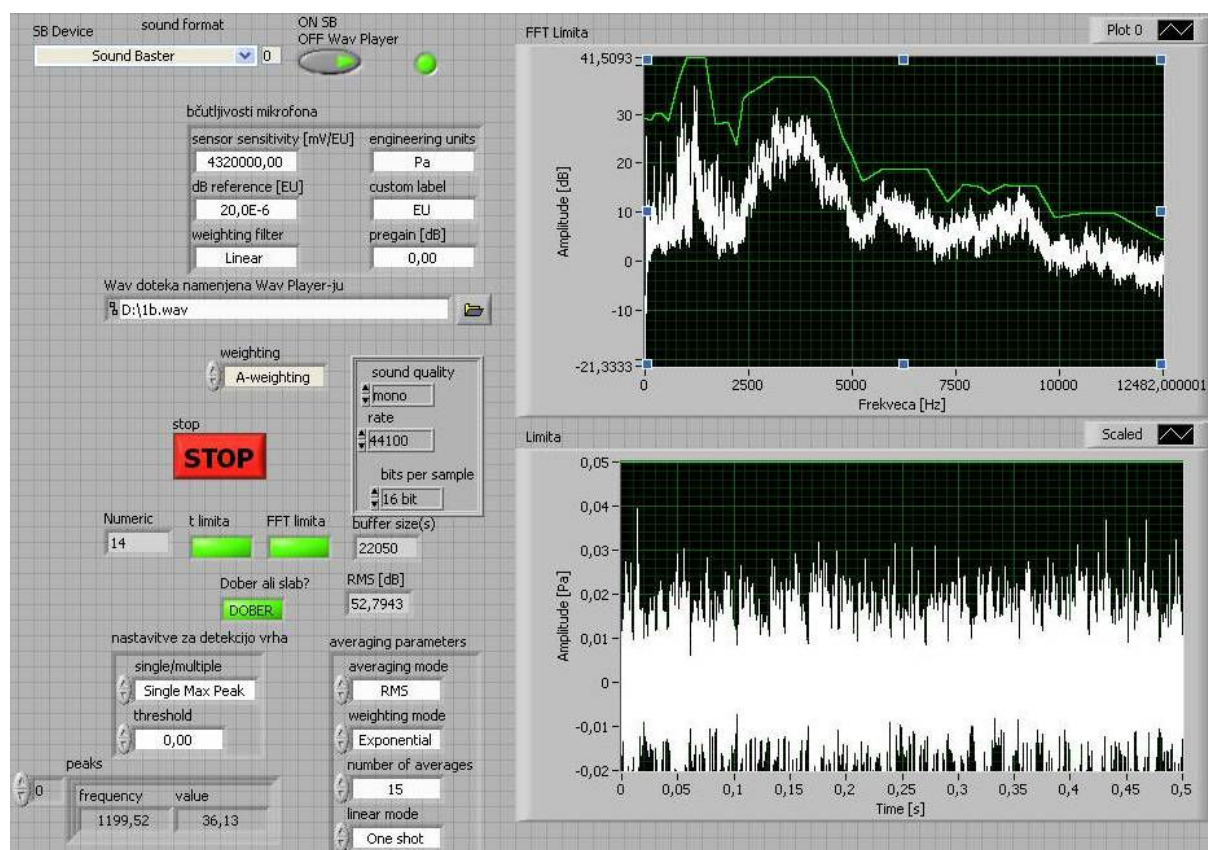
Črpalka št.22



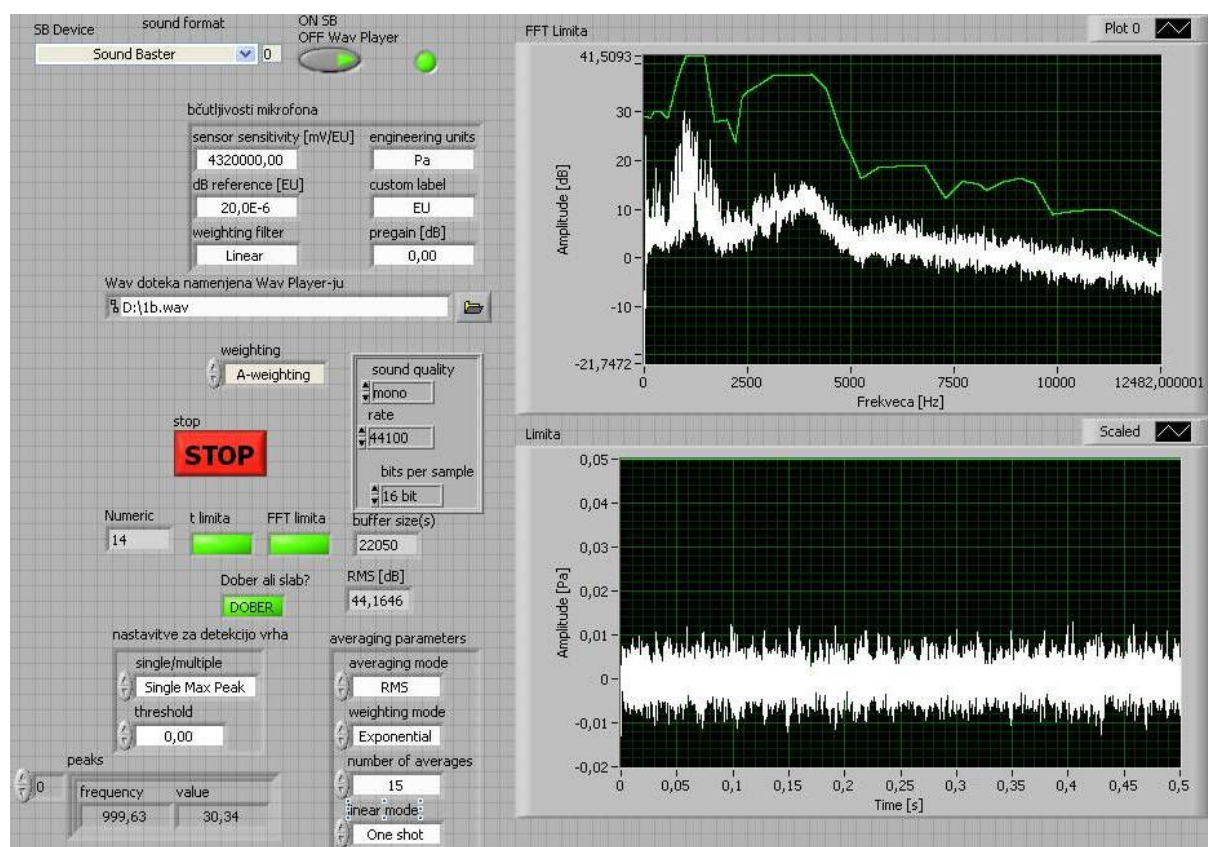
Črpalka št.23



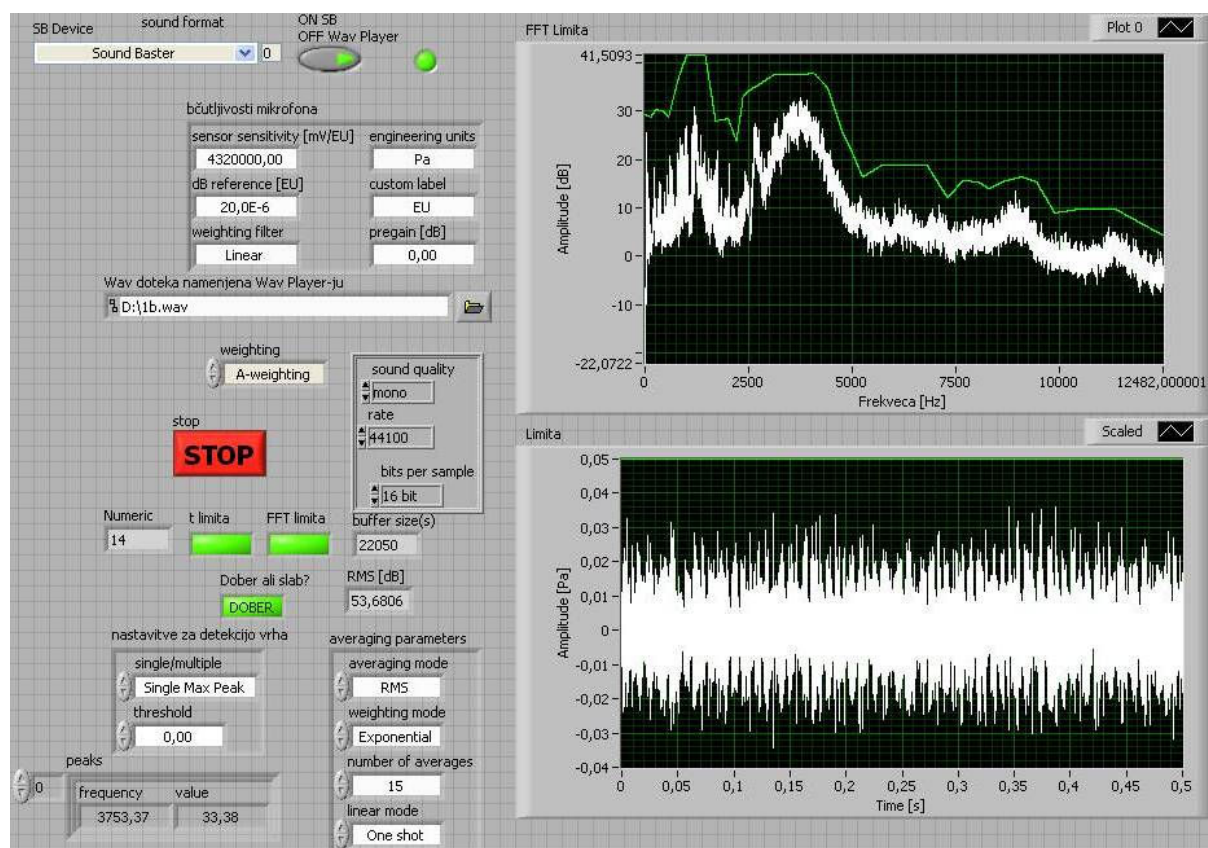
Črpalka št.24



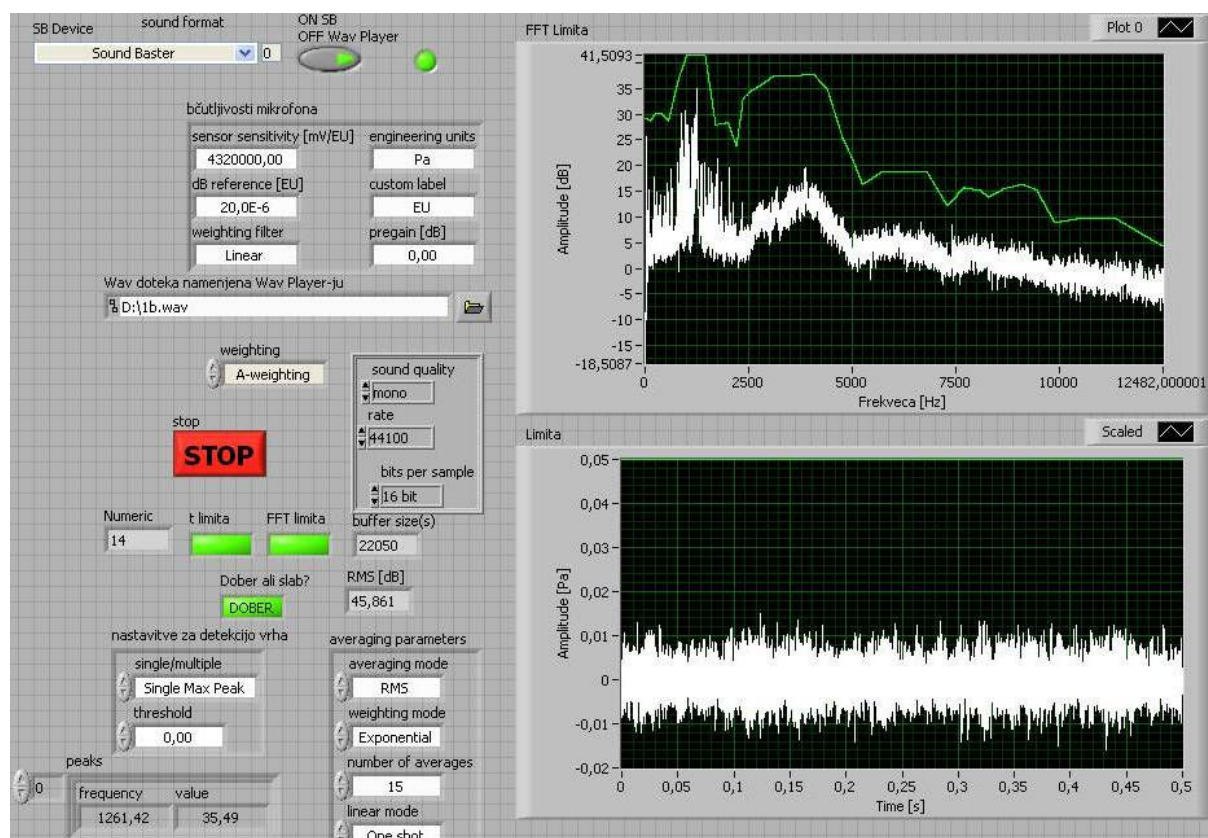
Črpalka št.25



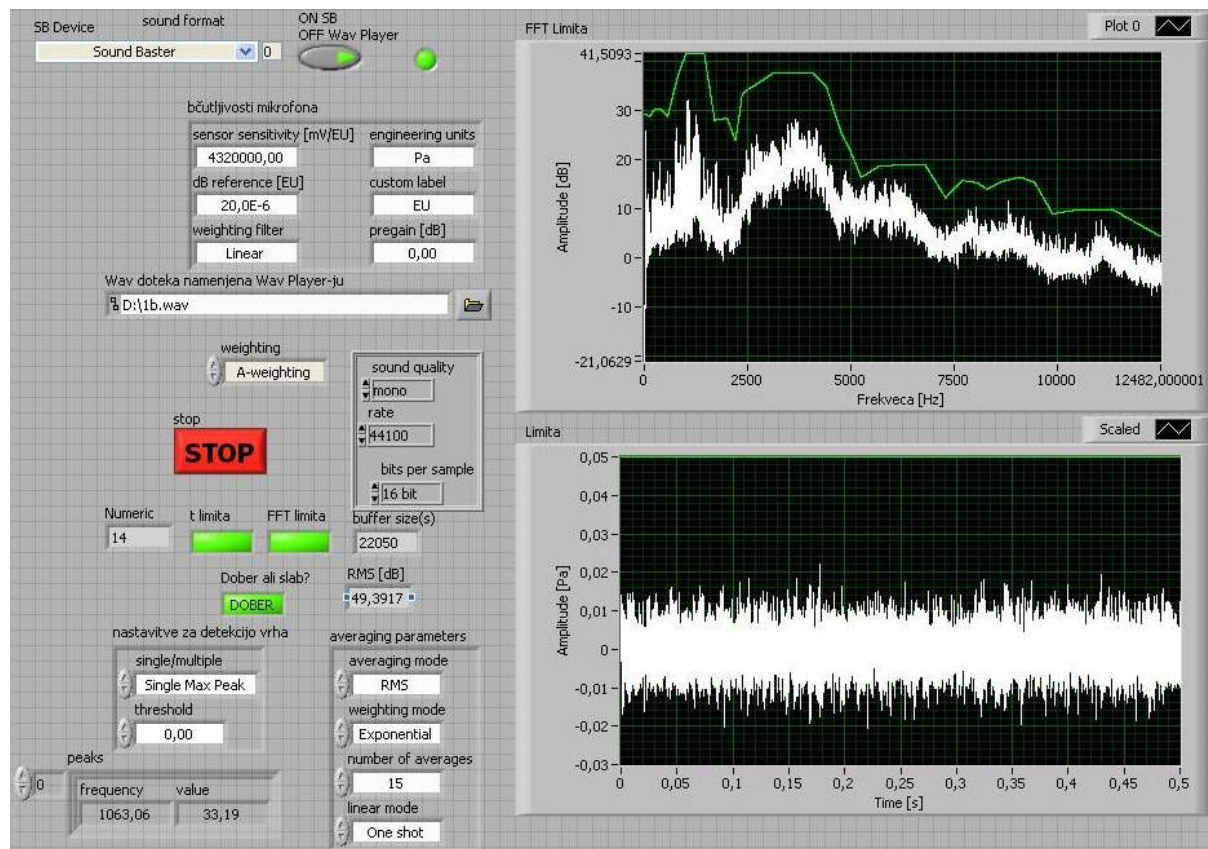
Črpalka št.26



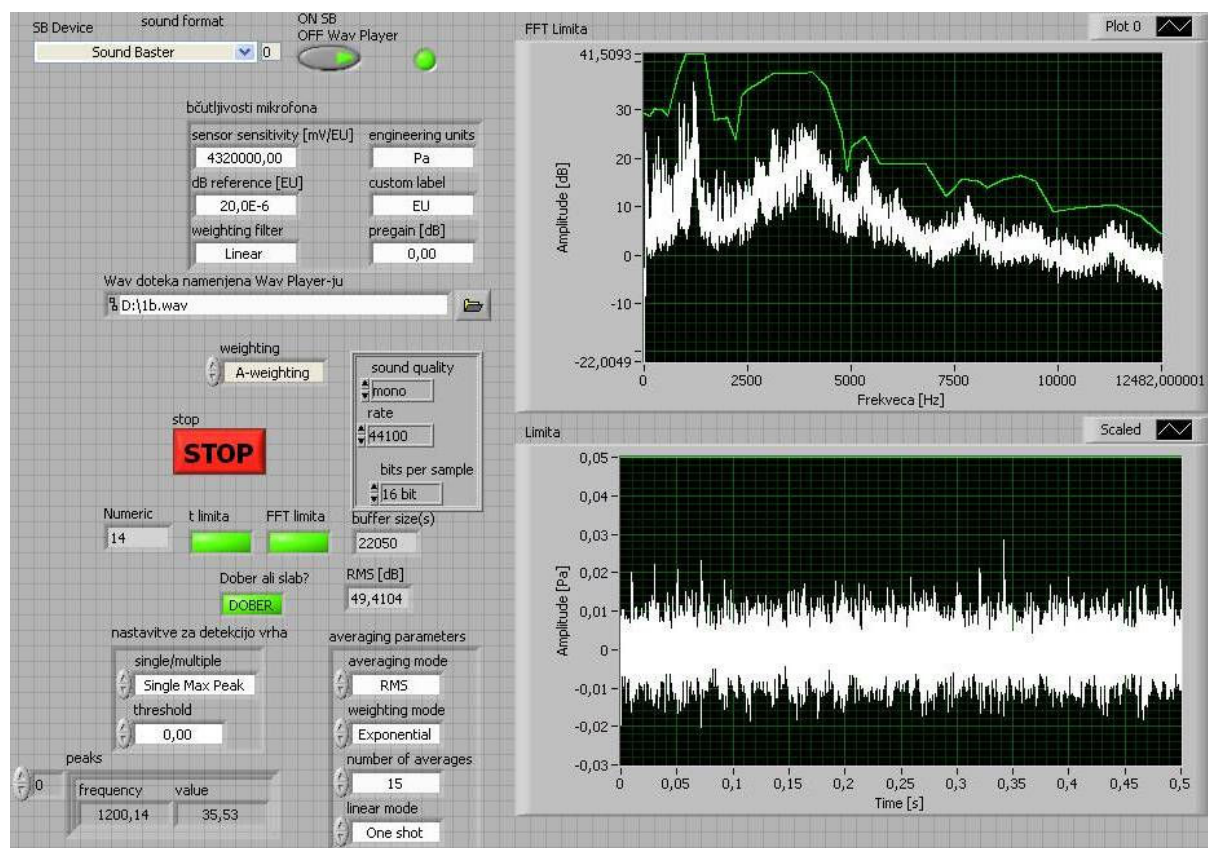
Črpalka št.27



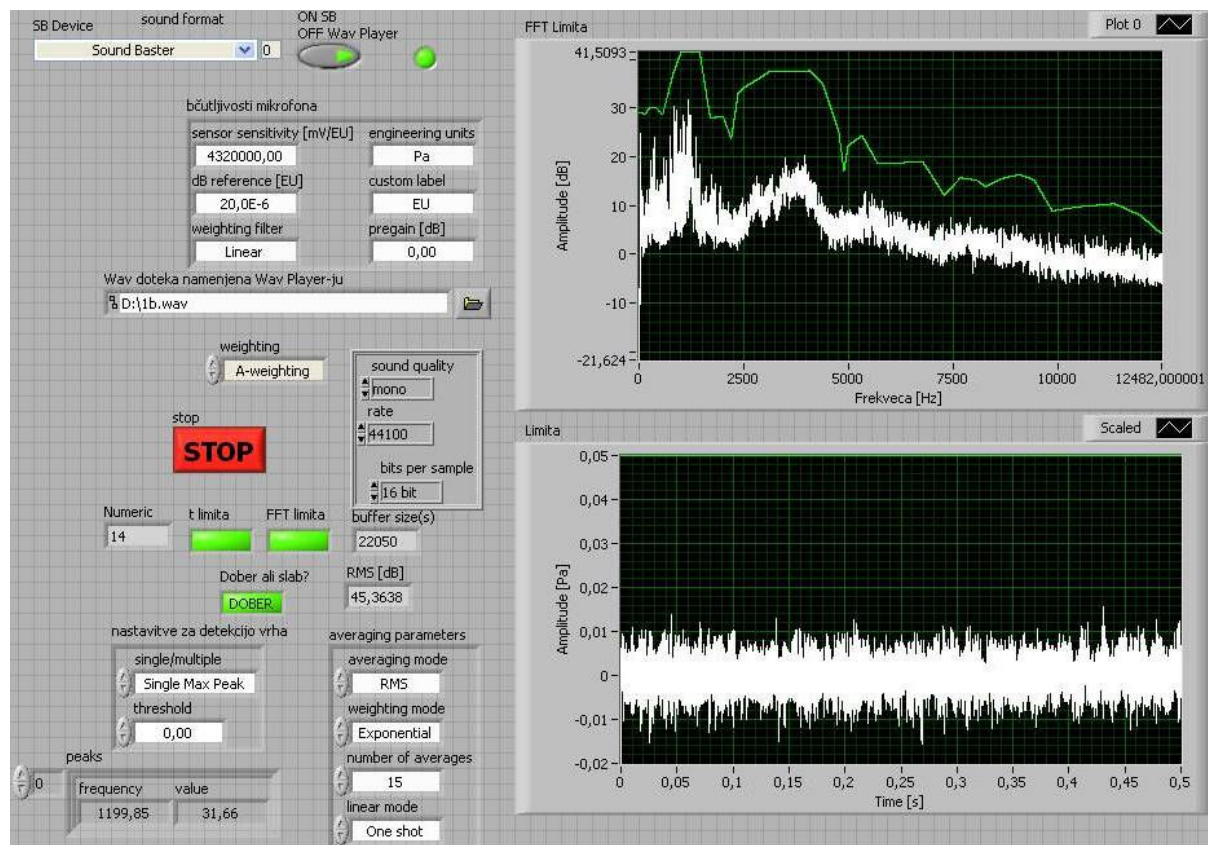
Črpalka št.28



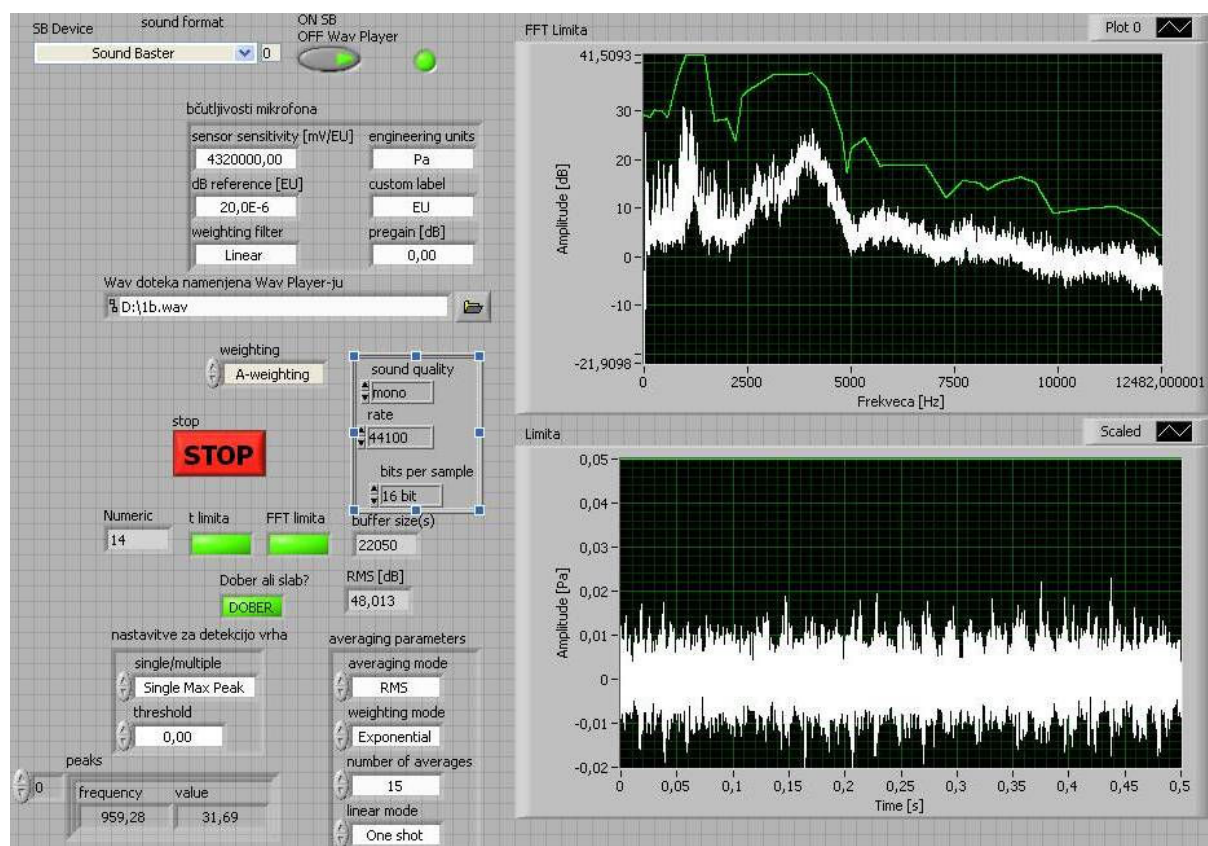
Črpalka št.29



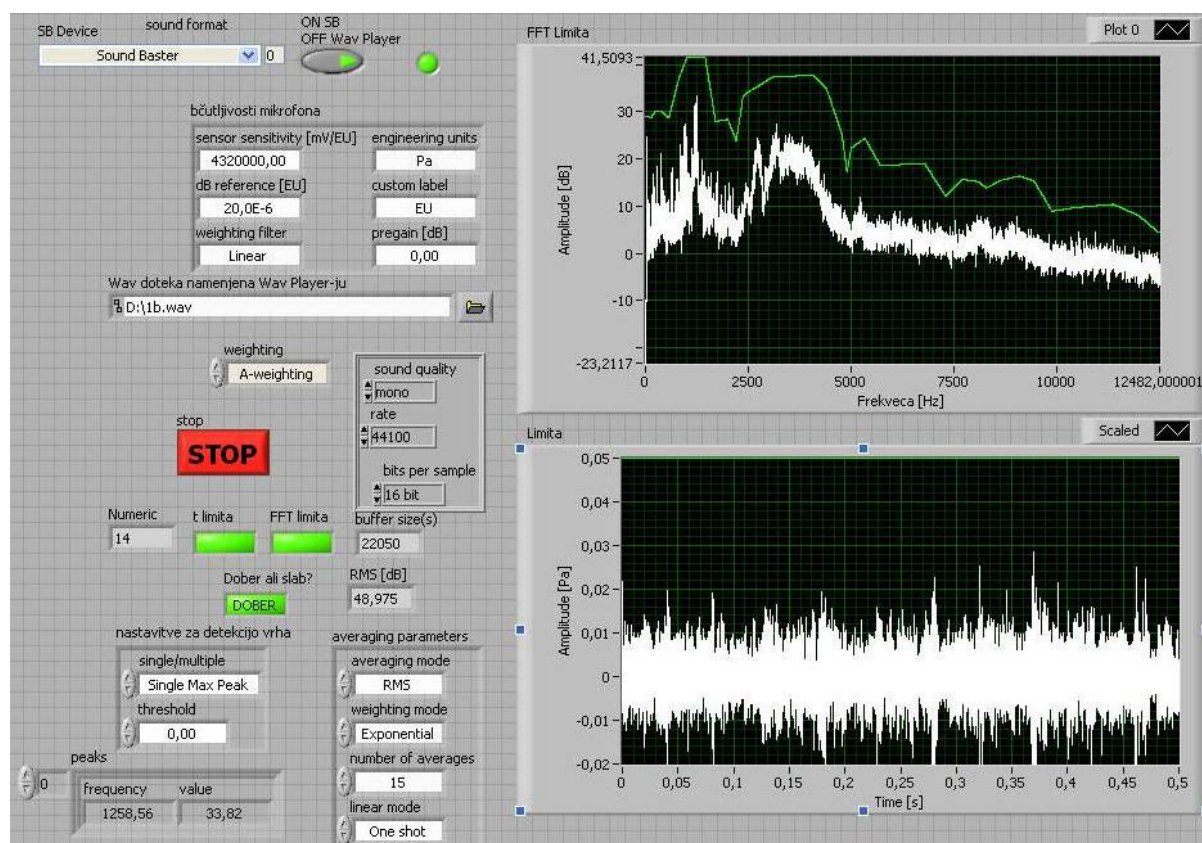
Črpalka št.30



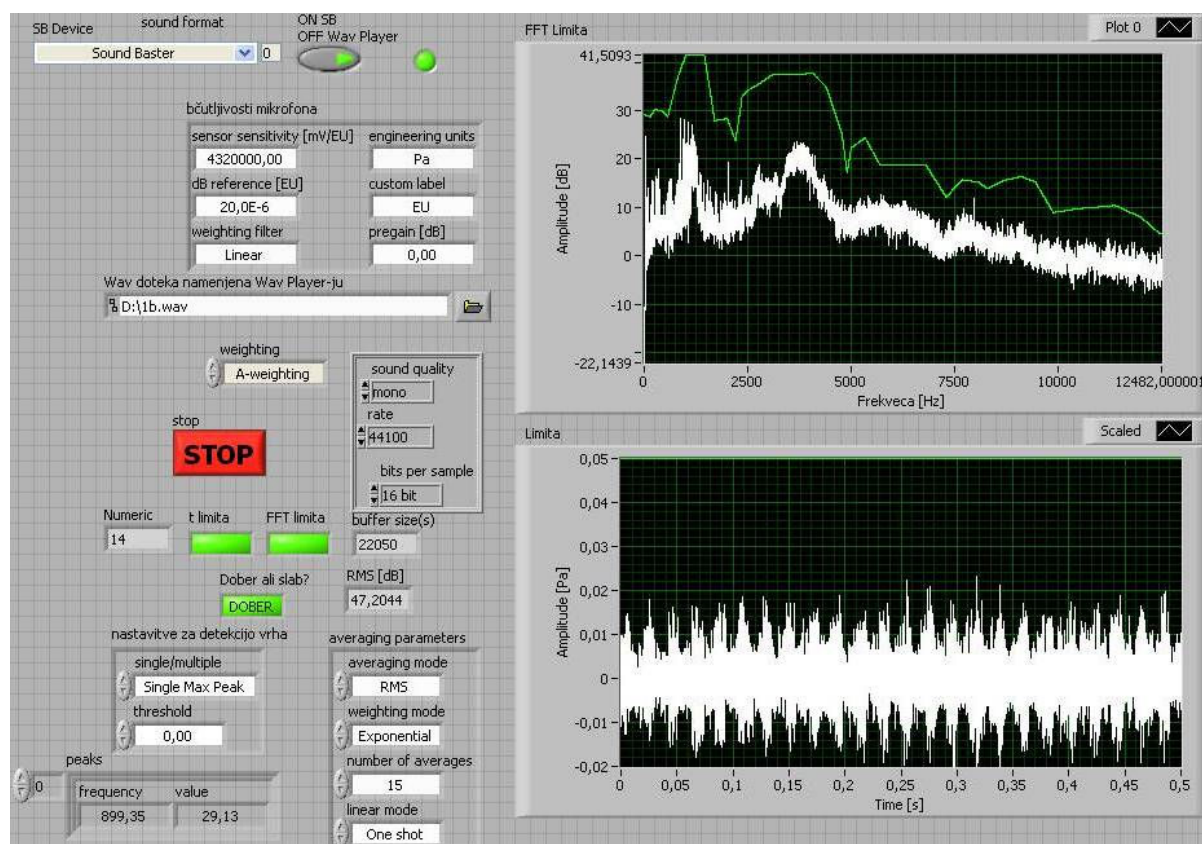
Črpalka št.31



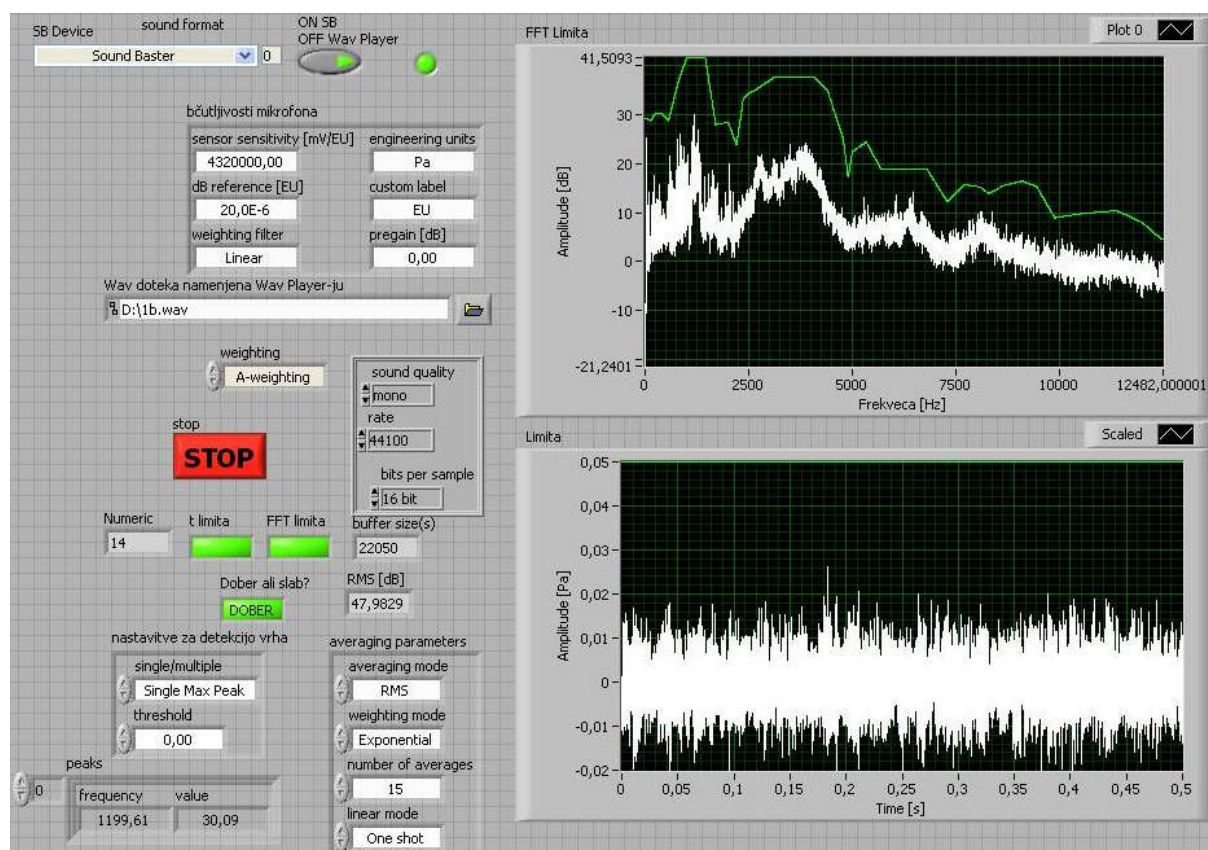
Črpalka št.32



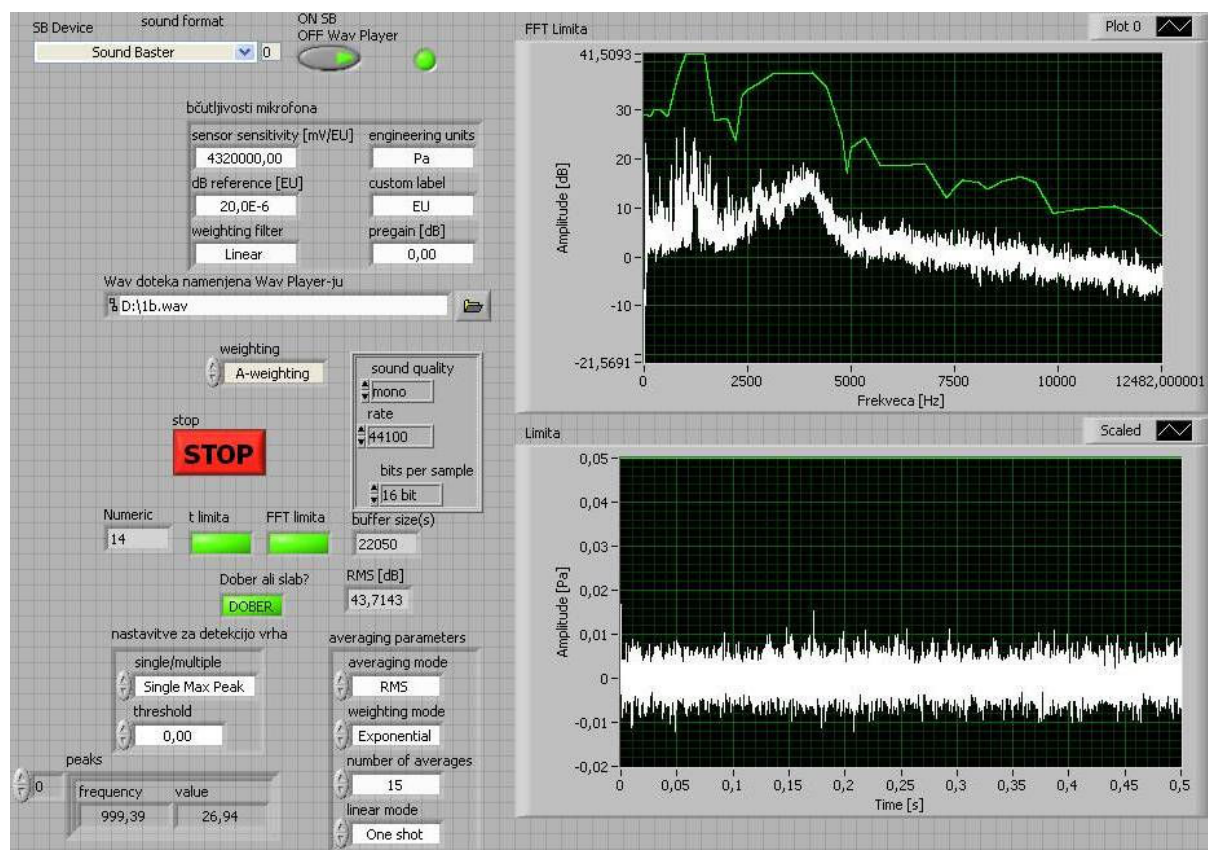
Črpalka št.33



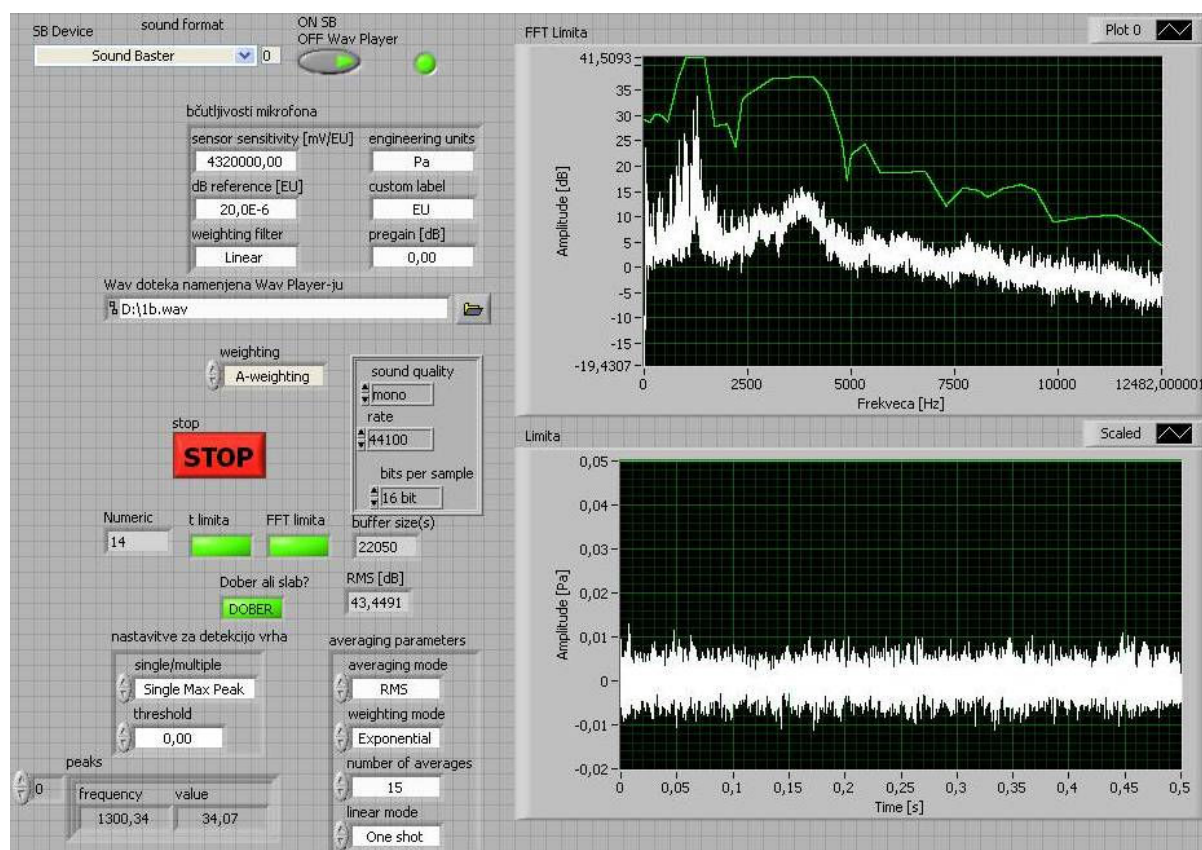
Črpalka št.34



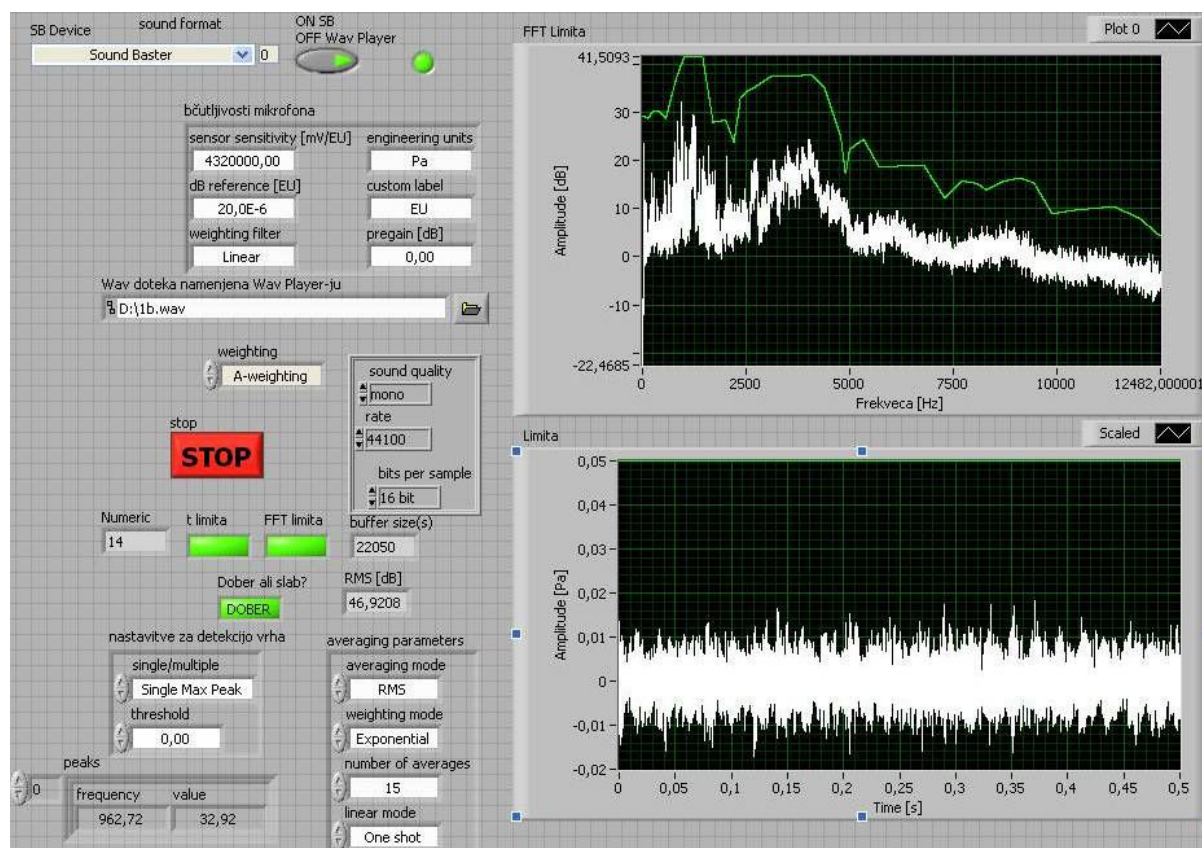
Črpalka št.35



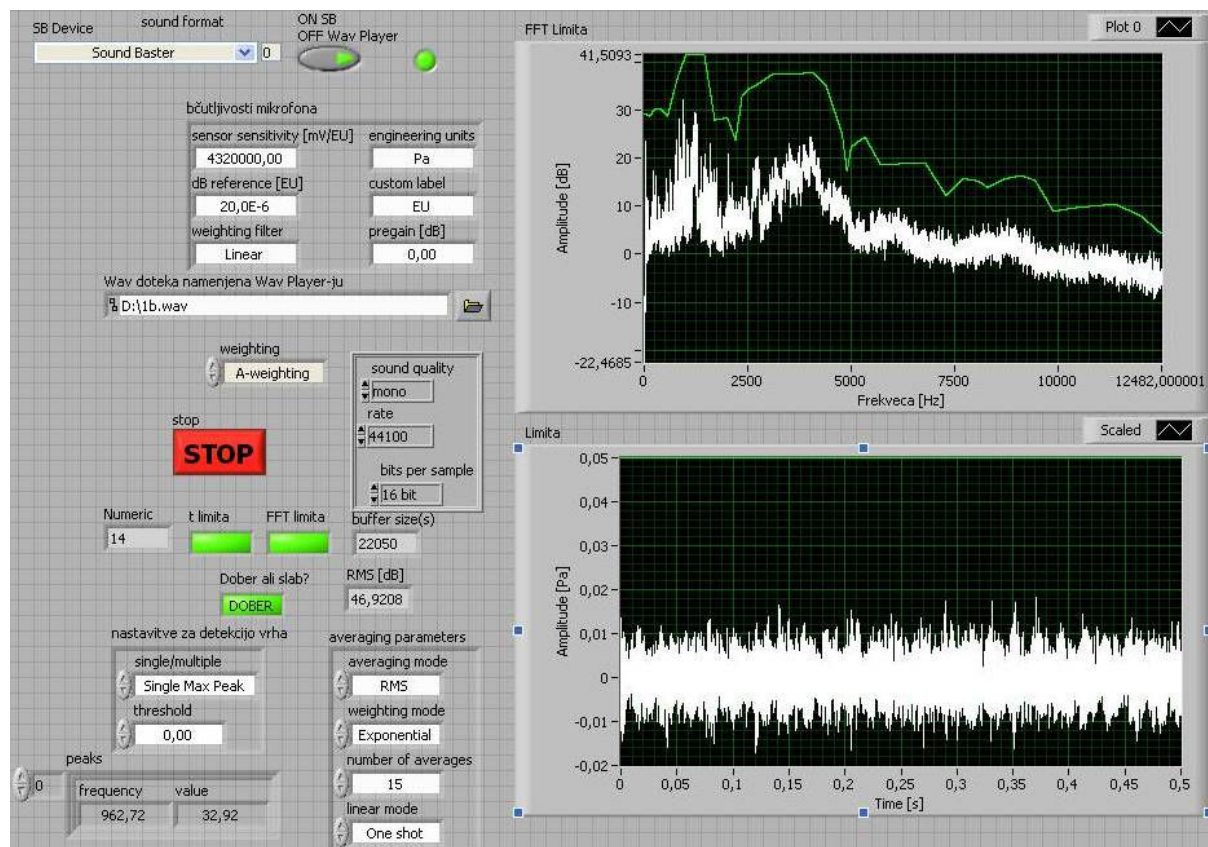
Črpalka št.36



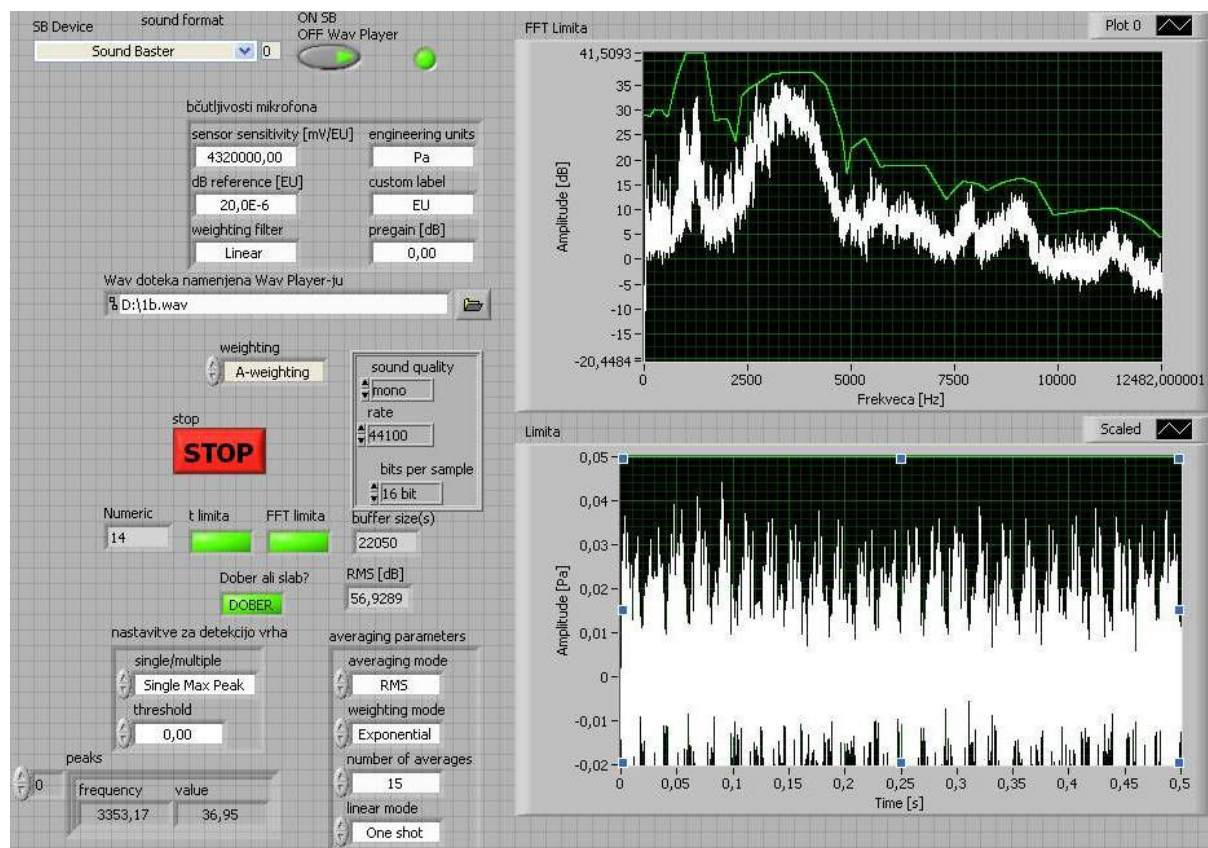
Črpalka št.37



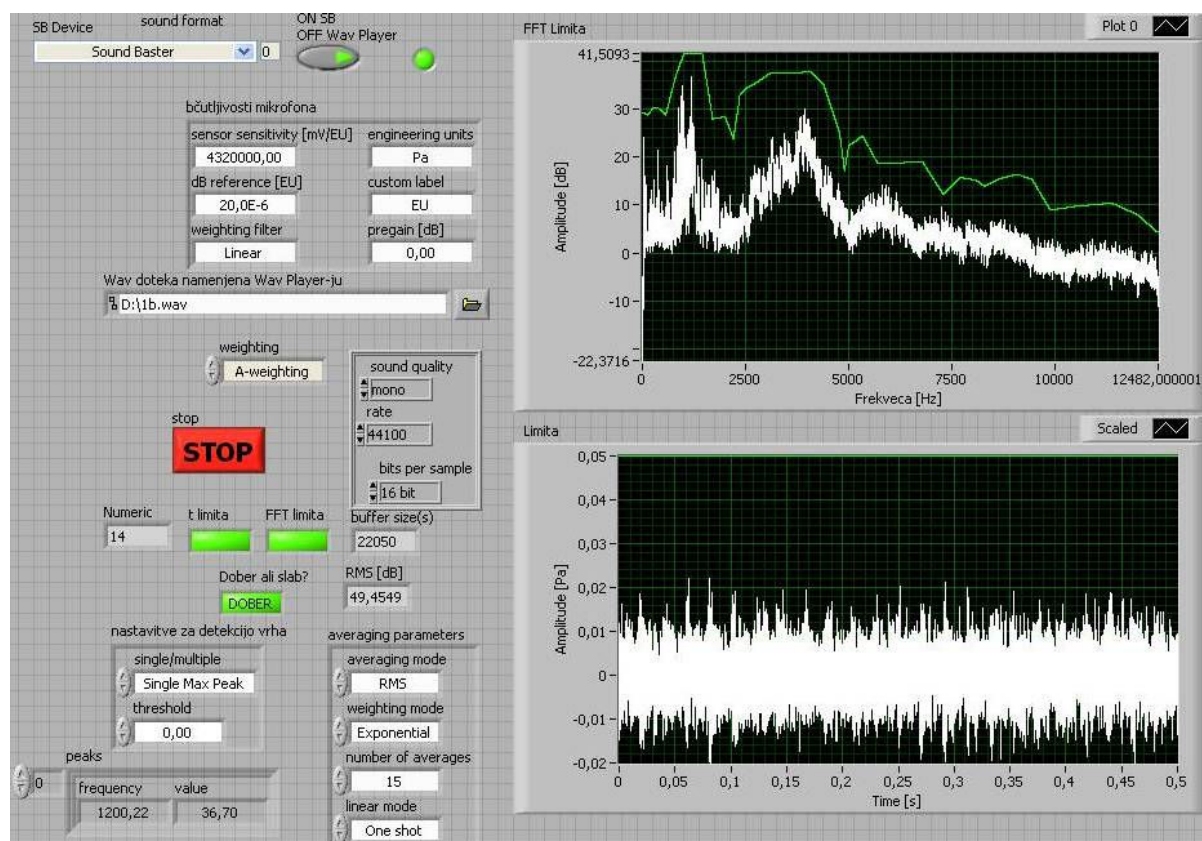
Črpalka št.38



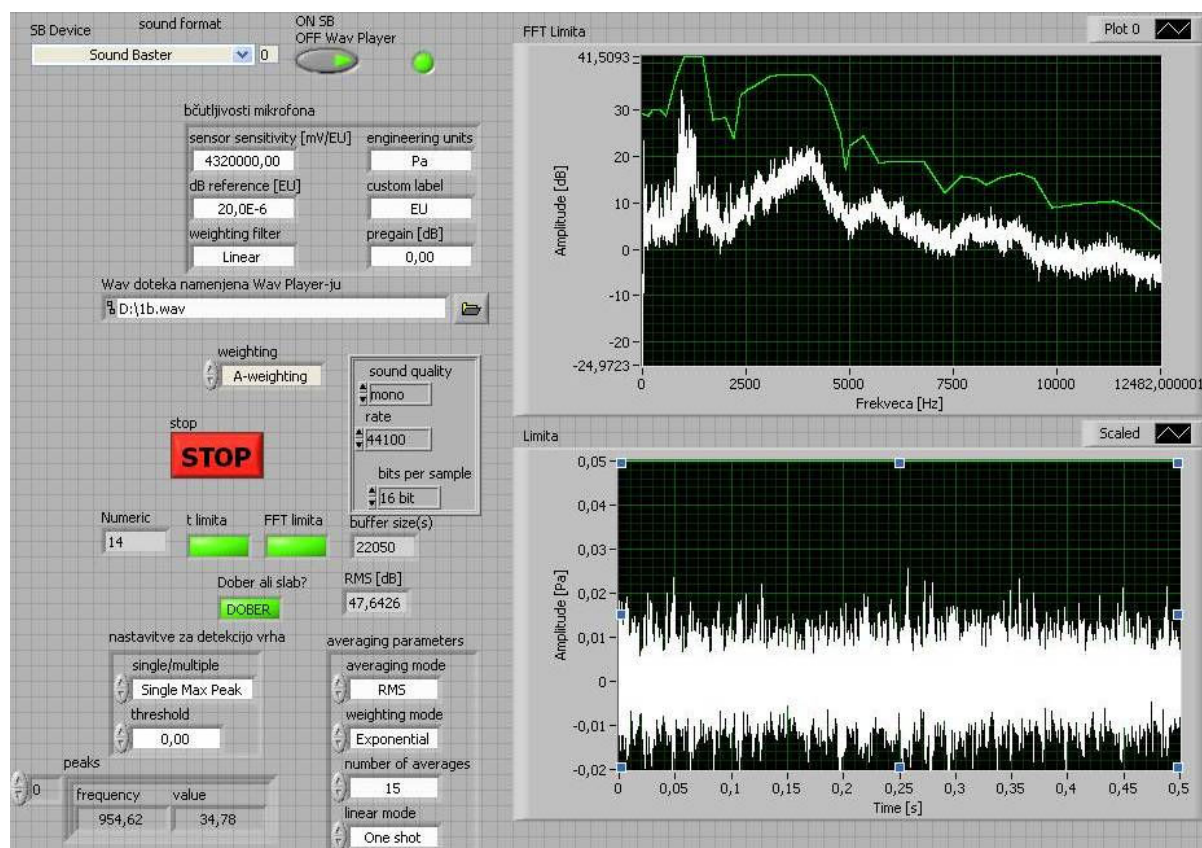
Črpalka št.39



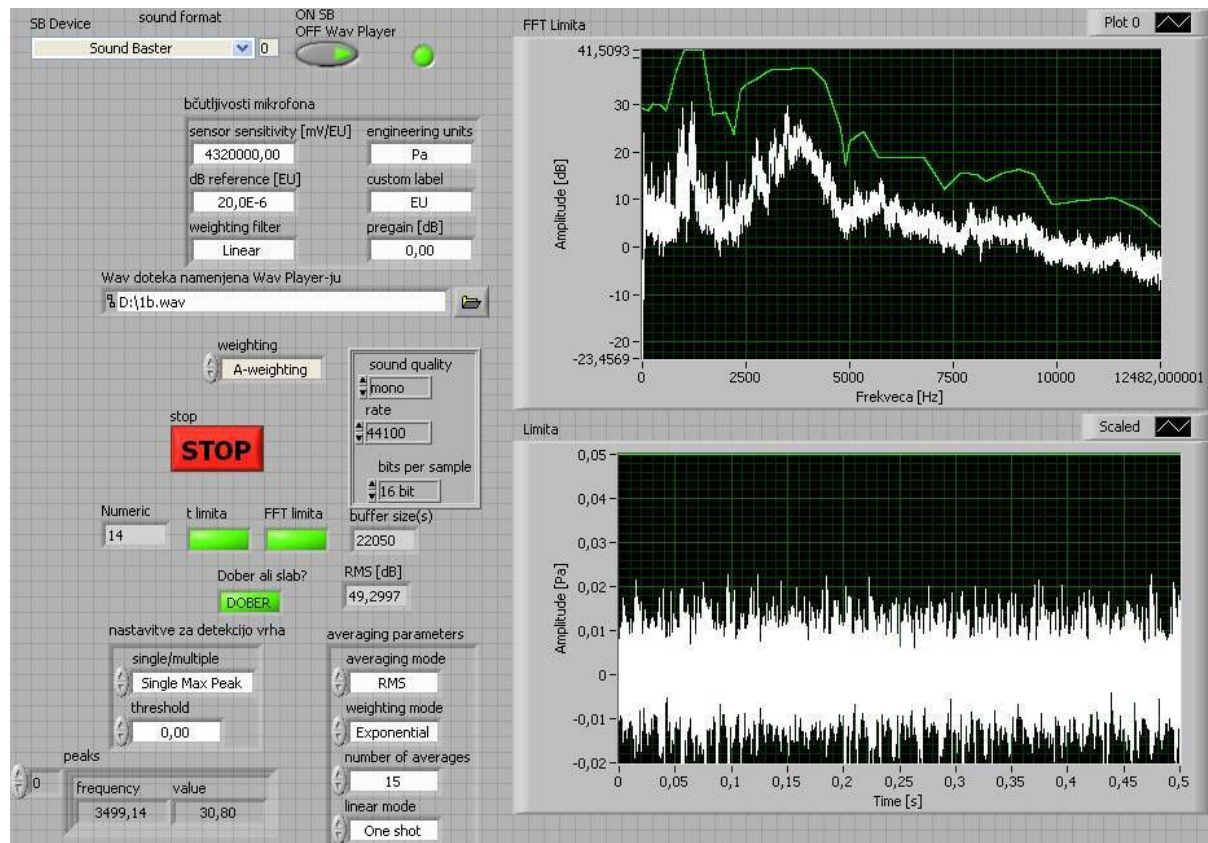
Črpalka št.40



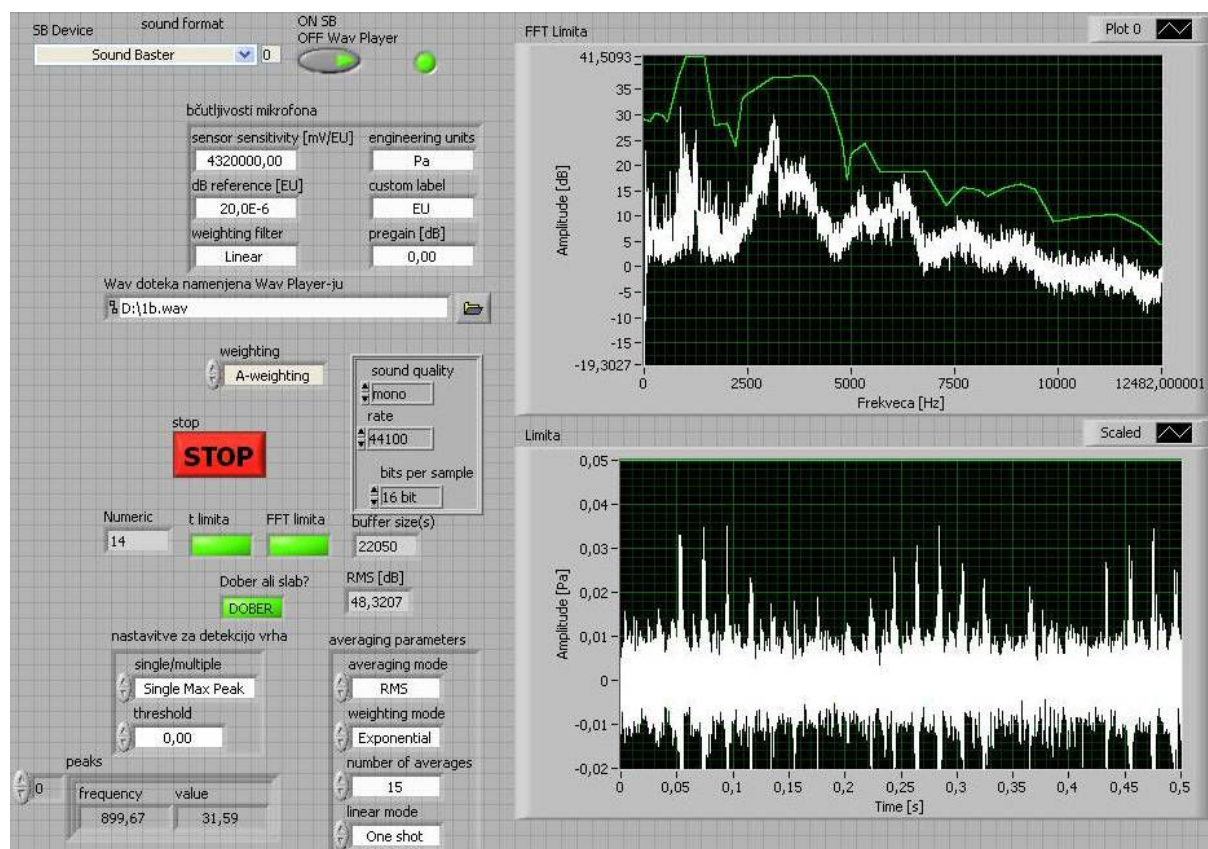
Črpalka št.41



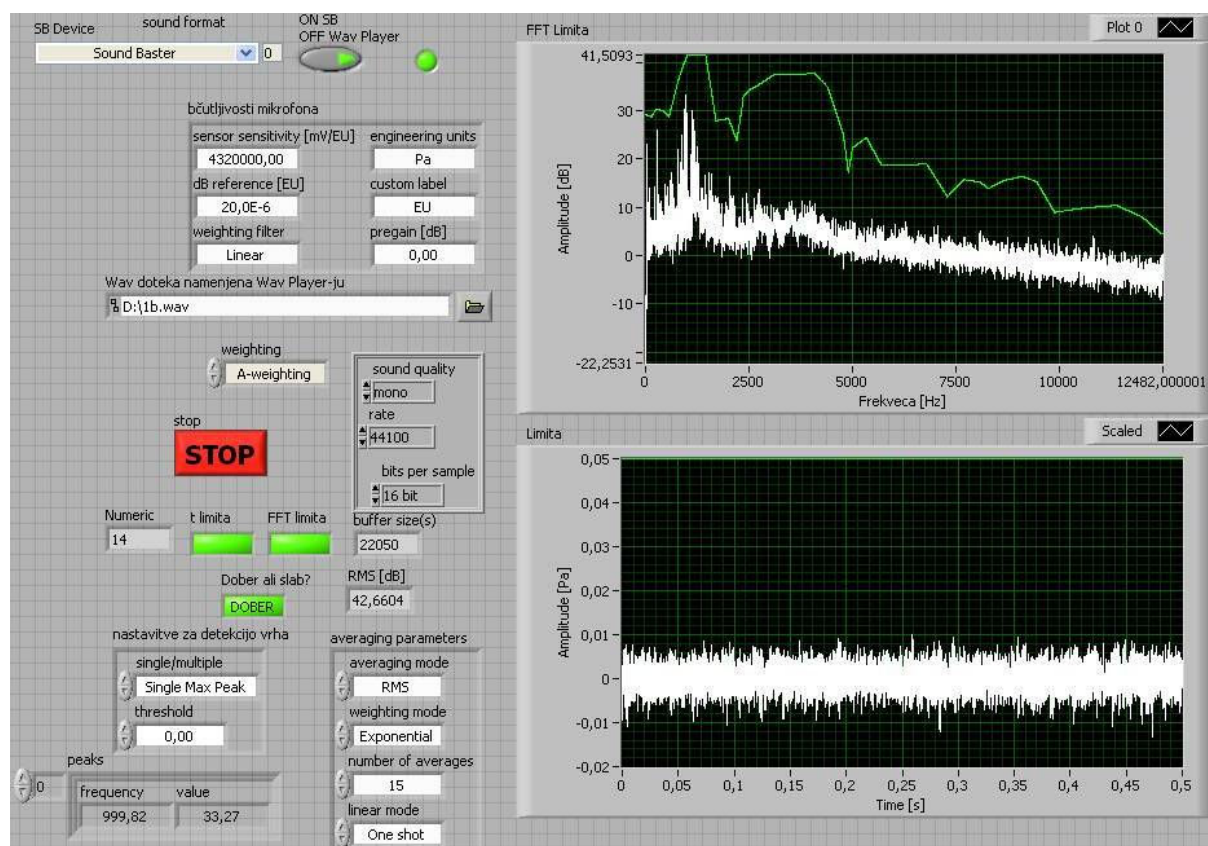
Črpalka št.42



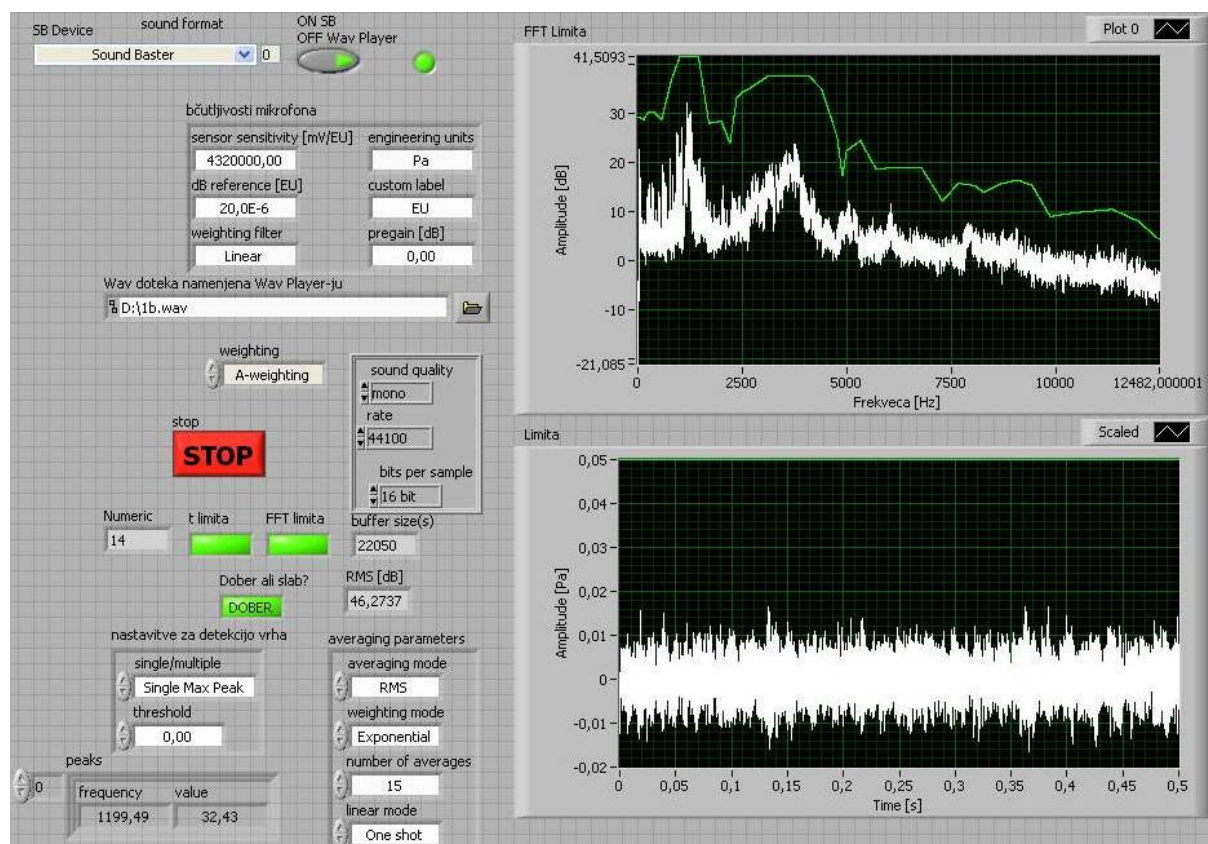
Črpalka št.43



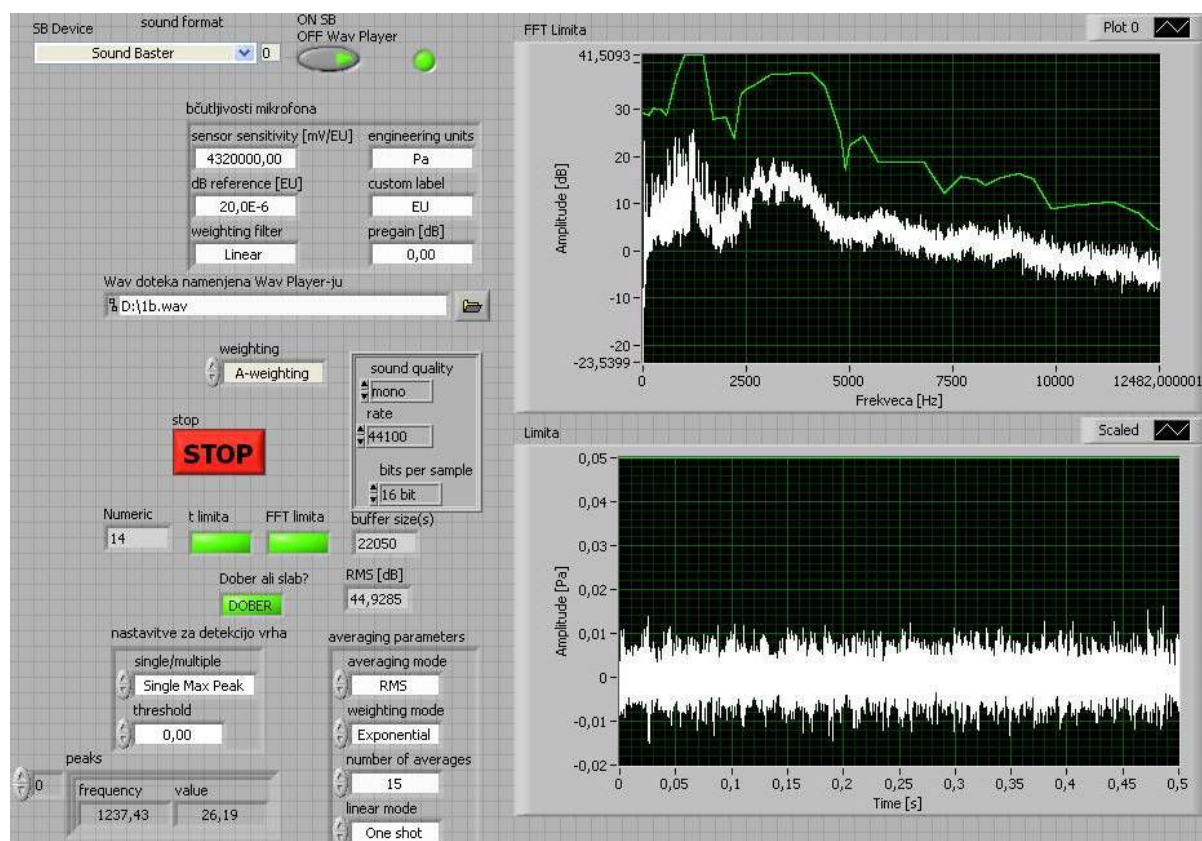
Črpalka št.44



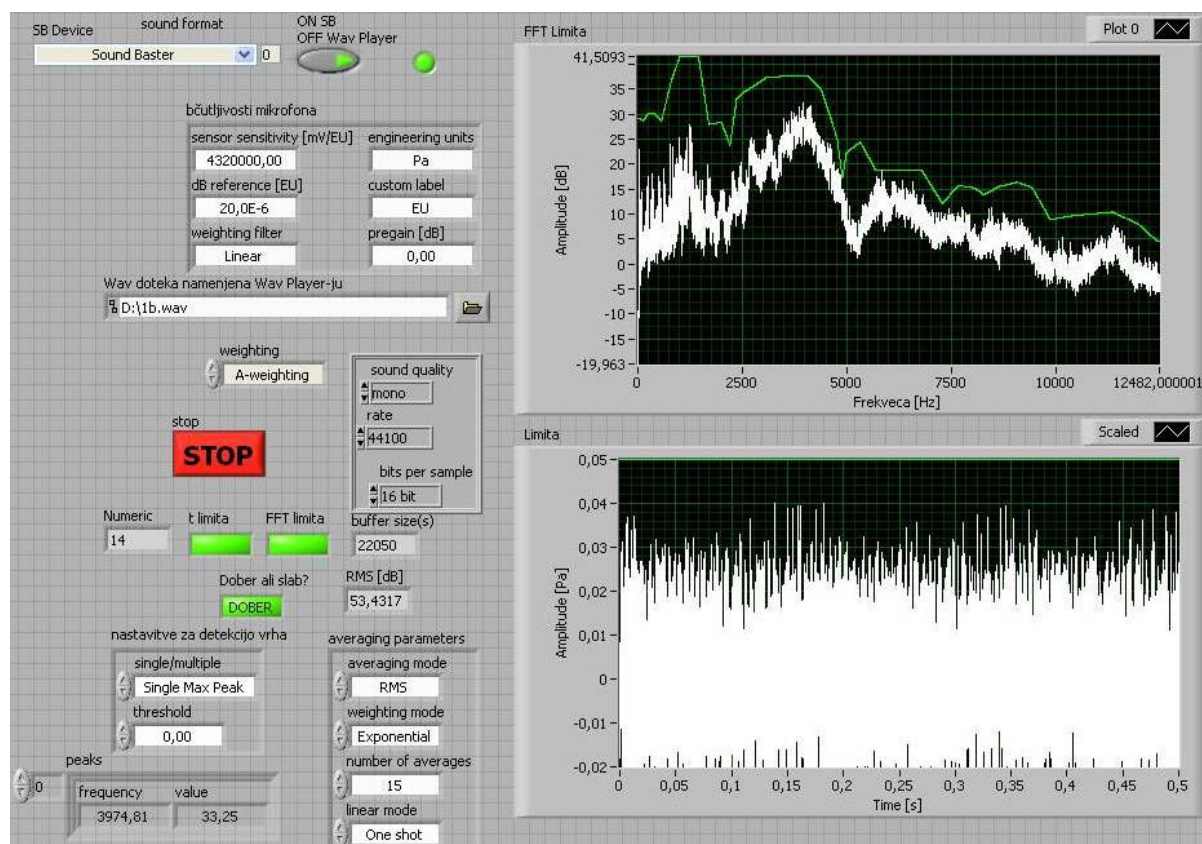
Črpalka št.45



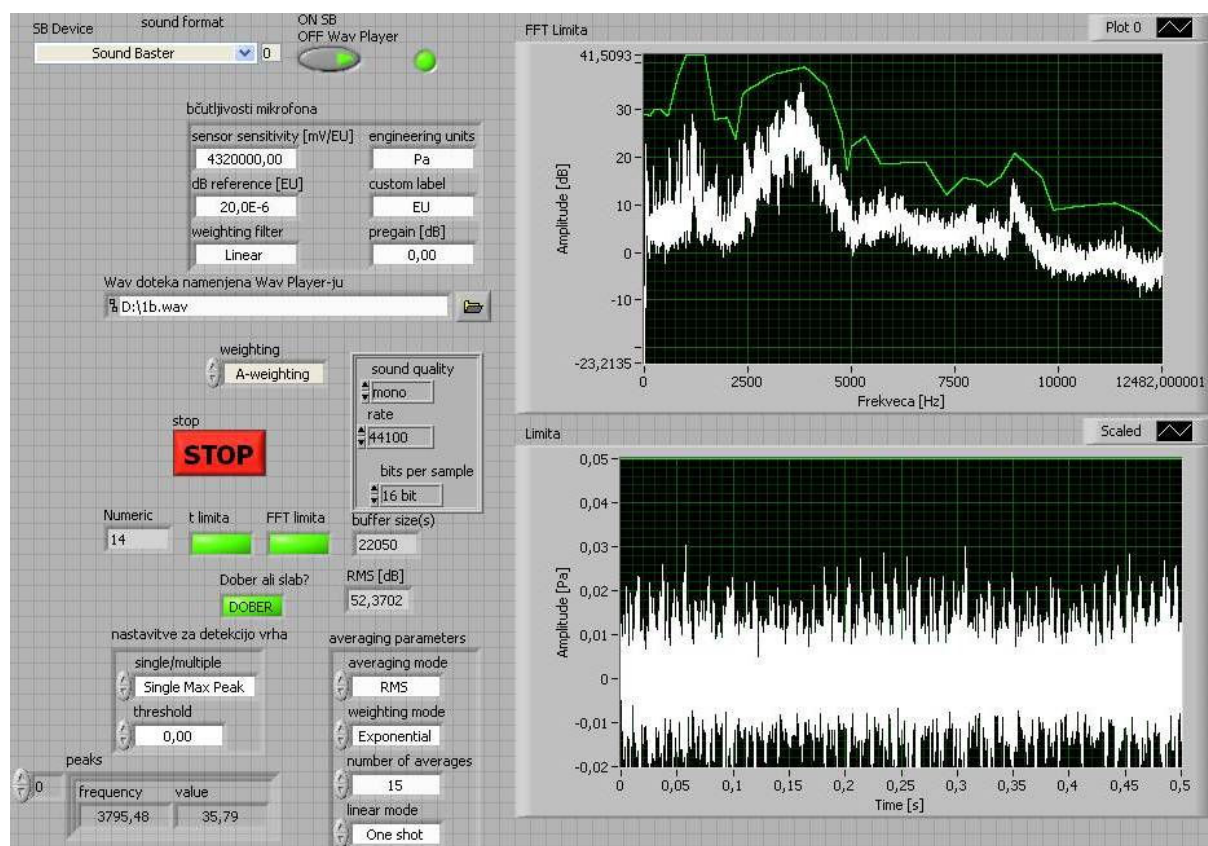
Črpalka št.46



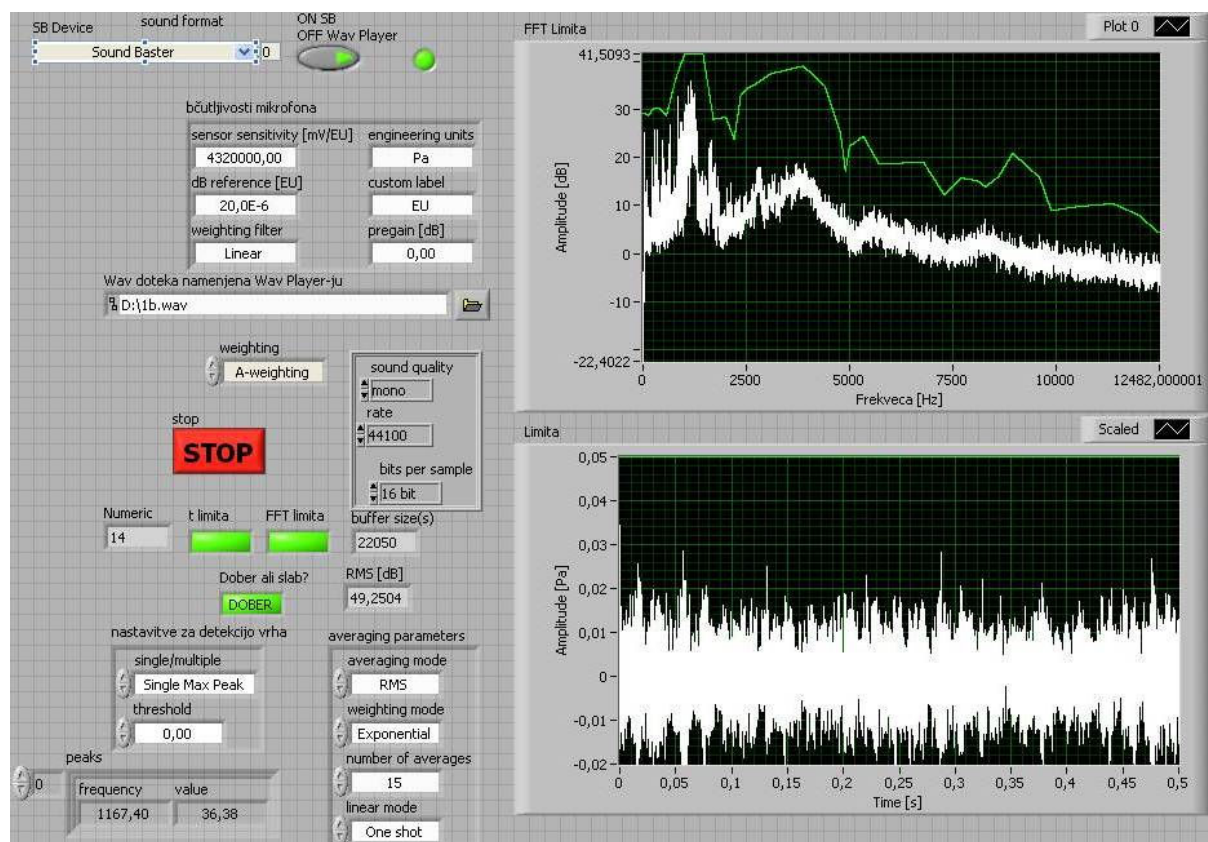
Črpalka št.47



Črpalka št.48



Črpalka št.49



Črpalka št.50

IZJAVA

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorja doc. dr. Boštjana Murovca, univ. dipl. inž. el.. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

Tine Albreht

Ljubljana, 2006