

Autor

Mr Dragan Novković

PRODUKCIJA MUZIKE - TEHNOLOGIJE I TEHNIKE

Recenzenti

Mr Olivera Gračanin,
vanredni profesor, Akademija umetnosti Novi Sad

Mr Dragan Drinčić,
predavač, Visoka škola elektrotehnike i računarstva, Beograd

Tehnička obrada

Zorana Đorđević, d.i.a.

Dizajn korica

Mr Biljana Novković

Izdavač

Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija, Beograd

Štampa

Školski servis Gajić, Beograd

Tiraž

30 primeraka

ISBN

978-86-7982-186-7



Mr Dragan Novković

**PRODUKCIJA
MUZIKE
TEHNOLOGIJE I TEHNIKE**



**Visoka škola elektrotehnike i računarstva
strukovnih studija
Beograd, 2015.**

SADRŽAJ

9

PREDGOVOR

13

ANALIZA STEREOFONSKIH EFEKATA METODOM FAZORA

I deo

1.1 Lokalizacija jednog zvučnog izvora

1.2 Slušalac u polju dva zvučna izvora

1.3 Reprodukција fazno pomerenih signala

27

OSNOVNI PRINCIPI FORMIRANJA STEREO ZVUČNE SLIKE

II deo

2.1 Tehnike stereofonskog snimanja zvuka

2.2 Akustička podela mikrofona

2.3 Koincidentna stereo postavka

2.3.1 X-Y postavka

Kardiodni par

Bidirekcionni par

Hiperkardiodni par

2.3.2 Praktični aspekti korišćenja X-Y tehnike

2.3.3 M-S postavka

Osnovne karakteristike M-S tehnike

Praktični aspekti korišćenja M-S tehnike

2.4 „Spaced-apart” tehnike

2.5 „Decca-tree” postavka

2.6 ORTF i NOS postavke

2.7 Kombinovane tehnike

„*Close miking*” tehnike

Panorama regulator

75

VREMENSKA OBRADA SIGNALA

III deo

3.1 Zvučni prostor

**3.2 Praktični aspekti upotrebe digitalnih uređaja
za veštačku reverberaciju**

3.3. Specijalni efekti

3.3.1 Efekti bez modulacije

3.3.2 Efekti sa modulacijom

89

UREĐAJI ZA OBRADU DINAMIKE

AUDIO SIGNALA

IV deo

4.1 Podela uređaja za obradu audio signala

4.2 Povezivanje uređaja za obradu dinamike audio signala u audio lanac

4.3 Uređaji za smanjenje dinamičkog opsega signala

4.3.1 Diodni ograničavač

4.3.2 Ograničavači nivoa sa povratnom spregom

4.3.3 Vremenske konstante povratne sprege kola
za obradu dinamike audio signala

Vreme reakcije

Vreme opuštanja

Kontrola vremena reakcije i opuštanja

Obrada dinamike signal po frekvencijskim podopsezima

Aktivna konstant vremena opuštanja

Vreme zadržavanja

4.4 Uredaji za proširivanje opsega dinamike

4.4.1 Propusnik signala

4.4.2 Principi realizacije

Subtractive Feedback Gate

Ekspander

Upotreba uređaja za smanjivanje opega dinamike signala

4.5 Primeri upotrebe gejta i kompresora u muzičkoj produkciji

4.5.1 Pojedini aspekti primene kompresora

127

FILTERI I EKVILAJZERI

V deo

5.1 Podela filtera

5.2 Ekvilajzeri

5.3 Upotreba filtera i ekvilajzera

PREDGOVOR

Muzika, kao najimaginativnija, a verovatno i najmoćnija vrsta umetnosti, oduvek je privlačila čovekovu pažnju. Pa ipak, dugo vremena ona je bila privilegija vrlo ograničenog broja ljudi. Tek razvojem najhumanije od svih grana elektrotehnike – audiotehnike, muzika postaje dostupna svima koji su za nju zainteresovani.

Prve eksperimente na polju zapisa i reprodukcije zvuka vršio je francuski naučnik *Édouard-Léon Scott de Martinville*, 1860. godine. Sedamnaest godina kasnije, Edison je patentirao fonograf, koji je omogućavao da se zvučne vibracije, preko specijalnog noža, urezuju u obliku brazdi na valjak od podesnog materijala. Iste te brazde su naknadno, analognim postupkom, mogle biti rekonstruisane u originalni zvuk. Međutim, tek je ploča sa širokim rezom ušla u masovnu upotrebu, i na taj način postala prvi standardni „nosač” zvuka. Ona je podrazumevala mono zapis, koji je bio vrlo ograničenog trajanja i kvaliteta. Čak ni najkvalitetnije ploče tog tipa nisu omogućavale reprodukciju iznad frekvencije od 6.5 KHz.

Prilikom prisustvovanja izvođenju nekog muzičkog dela, slušalac, čak i zatvorenih očiju, ima veoma jasan utisak „prisutnosti”. To se, pre svega, odnosi na mogućnost preciznog pozicioniranja kako celokupnog orkestra, tako i svakog instrumenta ponaosob, kao i na osećaj akustičke atmosfere prostora u kojem se muzika izvodi. Snimanjem i reprodukcijom tog istog dela u jednokanalnom, mono sistemu slušalac gubi pravi osećaj za originalni zvučni prostor.

Svi izvori zvuka dolaze iz iste tačke – zvučnika, čime gube svoju pozicioniranost, dok sama muzika gubi na „dubini” i stiće se utisak kao da dolazi iz nekog otvora.

Iz tog razloga ljudi su se od samog početka trudili da stvore sistem koji će omogućiti što vernije i prirodnije prenošenje muzike do slušaoca. Već na prvi pogled je bilo jasno da je za tako nešto neophodno povećati broj kanala. U tom pravcu su išli i prvi eksperimenti, koji su sprovedeni tridesetih godina u *Dolby* laboratorijama, a koji su se zasnivali na korišćenju 3 kanala. Takvi višekanalni sistemi, nezavisno od toga koliki broj kanala poseduju, su još u ono doba dobili naziv stereo – tj. sistemi za prostornu reprodukciju zvuka. Osnovna prepreka uvođenju ovakvih sistema u masovnu upotrebu je bila tehnološke prirode, jer u to doba nije postojala mogućnost da se tolika količina informacija upiše na komercijalno isplativ medij. I tako, kada je 1958. godine stereo napokon počeo masovno da ulazi u komercijalnu upotrebu, on je podrazumevao korišćenje svega dva kanala. Jednostavno, više od toga nije moglo da se smesti na, u to doba novi i jedini stereo „nosač” zvuka, ploču sa mikrozrezom. Upravo bi se ta 1958. godina mogla proglasiti i godinom početka prve prave revolucije u sferi snimanja i reprodukcije zvuka, koja je izazvala pravu lavinu novih pronalazaka i tehnika, i podstakla razvoj ne samo audiotehnike, već i same muzike, otvarajući potpuno nove horizonte u njenom stvaranju i poimanju. Ljudi su bili prinuđeni da se prilagode dvokanalnom sistemu i da iz njega izvuku maksimum. Taj uzbudljivi proces iznalaženja novih metoda i „trikova” za što kvalitetnije formiranje zvučne slike još uvek traje, sa uvek novim i nepredvidljivim rezultatima.

Iako se radilo o napretku od samo jednog kanala, rezultati su bili fascinantni. Dvokanalnom stereo reprodukcijom je postalo moguće, do izvesne mere, rekonstruisati pozicioniranost izvora zvuka, osećaj dubine, prostora i akustičke atmosfere. Zvuk više ne dolazi iz jednog zvučnika, već iz celokupnog prostora između dva zvučnika, tzv. zvučne baze. Običan čovek je po prvi put imao mogućnost da doživi osećaj onoga što se naziva stereo zvučna slika, dok se čitav niz generacija inženjera, snimatelja i producenata sve ove godine svojski trudio da istu tu sliku predstavi u što boljem svetlu.

Ovaj udžbenik ima za cilj da ukaže na neke od osnovnih tehnika i polazišta koji se koriste pri kreiranju stereo zvučne slike. U tu svrhu, njegov prvi deo je posvećen analizi fenomena do kojih dolazi prilikom stereo reprodukcije. Ta analiza je sprovedena uz korišćenje metode fazora, i ima za cilj da pojasni neke od principa na kojima se zasniva tzv. stereo efekat. To se pre svega odnosi na sposobnost lokalizacije virtuelnog zvučnog izvora u okviru stereo baze, kao i na neke zanimljive aspekte međusobnog faznog odnosa signala u levom i desnom kanalu.

Muzika je umetnost koja se izvodi u vremenu, u situacijama sa ili bez auditorijuma. Iako to nije u svakom slučaju situacija (npr. u elektronskoj muzici), može se reći da je temelj

kvalitetne zvučne slike, pre svega, baziran na pravilnoj upotrebi mikrofona. Od načina postavke i vrste korišćenih mikrofona zavise ne samo njen konačan izgled (u smislu zvučanja), već i celokupan utisak koji neko ima prilikom slušanja. Iz tih razloga, drugi deo ovog udžbenika, je posvećen razmatranju klasičnih mikrofonskih tehnika, koje spadaju u bazične principe formiranja stereo zvučne slike. Prvi deo ove celine je posvećen podsećanju na osnovne vrste i karakteristike mikrofona. Nakon toga je razmotrena upotreba koincidentnog mikrofonskog stereo para, pri čemu su posebno analizirane X-Y i M-S postavke. Posebna pažnja je posvećena analizi svake od ovih postavki u zavisnosti od tipova korišćenih mikrofona. Sledeća oblast u okviru ove celine je analiza takozvanih „*spaced-apart*”, odnosno prostorno razdvojenih postavki. Nakon toga je ukazano na neke od mogućnosti kombinovanja različitih tehnika, što predstavlja i neku vrstu uvoda u poslednji analizirani tip postavke mikrofona, tzv. „*close miking*”.

Nakon snimanja (danas se ova faza u procesu produkcije muzike često zamenjuje postupkom odabira semplova) se pristupa sledećoj fazi u radu, koja se označava imenom miks. Miks je procedura koja podrazumeva obradu svih signala koji učestvuju u kompletnoj zvučnoj slici, sa ciljem njihovog usklađivanja u celinu koja na najbolji mogući način prezentuje dato muzičko delo krajnjem slušaocu. U tom postupku se signali obrađuju u jednom od tri moguća domena: vremenskom, dinamičkom ili frekvencijskom. Dakle, sve manipulacije audio signalima koji se tretiraju u miksu, koje jesu brojne i raznovrsne, mogu se svrstati u jednu od tri pomenute grupe. S obzirom na takvu činjenicu, ovaj udžbenik za cilj ima da čitaocu u tri odvojena poglavlja predstavi osnovne tehnike, termine i polazne preporuke za upotrebu uređaja koji služe za procesiranje audio signala.

ANALIZA STEREOFONSKIH EFEKATA METODOM FAZORA

I deo

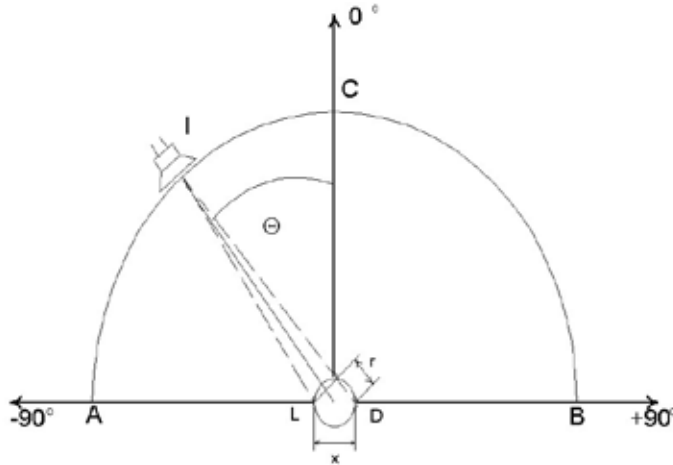
Jedan od osnovnih zadataka muzičke produkcije jeste formiranje kvalitetne zvučne slike koja potencijalnom slušaocu može da prenese sve bitne komponente muzičkog dela čijoj reprodukciji prisustvuje. Stereofonski efekat, do kojeg dolazi prilikom reprodukcije zvučnog sadržaja putem nekog od višekanalnih (dva ili više kanala) audio sistema, predstavlja osnovu na kojoj se svaka zvučna slika gradi. Iz tog razloga, prvi deo ovog udžbenika posvećen je analizi fenomena do kojih dolazi prilikom stereo reprodukcije zvuka u sistemima dvokanalne stereofonije, na osnovu kojih je moguće izvesti sve potrebne zaključke i o stereofonskim efektima do kojih dolazi u sistemima u kojima se reprodukcija obavlja putem više od dva kanala. Ta analiza je sprovedena uz korišćenje fazora, fizičkih vektora, kojima se na neposredan način mogu predstaviti veličine bitne za razumevanje ovog problema - nivo i faza reprodukovanog signala na mestu slušanja. U ovom poglavlju je objašnjena i sposobnost lokalizacije virtuelnih zvučnih izvora u okviru stereo baze, kao i neki, sa aspekta muzičke produkcije, zanimljivi fenomeni do kojih dolazi prilikom istovremene reprodukcije fazno pomerenih signala u levom i desnom kanalu. U tom smislu ovo poglavlje se sastoji iz sledećih celina:

1. Lokalizacija jednog zvučnog izvora
2. Slušalac u polju dva zvučna izvora
3. Reprodukcija fazno pomerenih signala

1.1 Lokalizacija jednog zvučnog izvora

Čulo sluha predstavlja izuzetno kompleksno, i do dan danas do kraja neistraženo ustrojstvo, koje kroz spregu samog uva, centralnog nervnog sistema, pa, šire gledano, i celog tela rezultuje osećajem sluha. Jedna od vrlo bitnih karakteristika sluha je i mogućnost lokalizacije zvučnog izvora, kao i pravca i smera u kojem se taj zvuk prostire. Ova osobina je najdirektnije povezana sa činjenicom da je uvo „parni organ”, jer je samo kombinacijom i analizom zvuka koji stiže do svakog uha ponaosob mozak u stanju da odredi tačan položaj izvora. Osobe gluve na jedno uvo od samog rođenja ovu sposobnost jednostavno nemaju, a zanimljivo je da i kod potpuno zdravih osoba ova osobina nije „apsolutna”, već u velikoj meri zavisi od trenutnog psihičkog stanja, konkretnog vizuelnog doživljaja i slično.

Zvuk koji iz jednog zvučnog izvora pristiže do levog, odnosno desnog uha, nije isti, već se razlikuje kako po intenzitetu, tako i po fazi, tj. vremenskom trenutku pobude svakog uha ponaosob. Nizom eksperimenata je vrlo jasno pokazano da upravo ove dve vrste razlika (intenzitetna i vremenska, kao i njihova kombinacija) imaju ključnu ulogu u procesu lokalizacije. S obzirom da se, bez ikakvog gubitka na opštosti daljih razmatranja, zvučni talas može posmatrati kao niz sinusoidalnih funkcija koje se u svakom trenutku odlikuju određenim intenzitetom i faznim uglom, u cilju lakšeg objašnjavanja i razumevanja, analizu nekih stereofonskih efekata je moguće sprovesti metodom fazora, „fizičkih” vektora koji su promenljivi u vremenu, a u svakom trenutku daju informaciju o intenzitetu i fazi veličine koju predstavljaju.



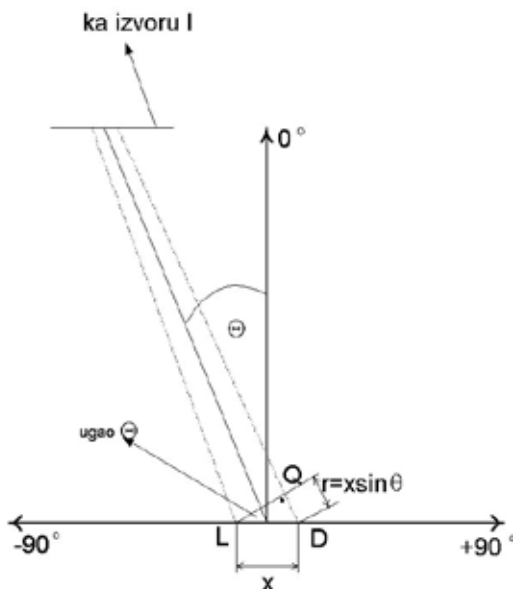
Slika 1: Lokalizacija jednog zvučnog izvora

Sada ćemo, na vrlo jednostavan način, dovesti u vezu položaj koji u odnosu na slušaoca zauzima neki zvučni izvor, i međusobni položaj koji zauzimaju fazori koji opisuju akustički pritisak koji stvara posmatrani izvor na mestu levog, odnosno desnog uha slušaoca. Posmatrajmo crtež prikazan na slici 1.

Neka se zvučni izvor I, koji emituje zvuk neke proizvoljne frekvencije, kreće po polukrugu koji se nalazi u vertikalnoj ravni, sa glavom slušaoca u njegovom centru. Označimo sa x rastojanje između levog (L) i desnog (D) uha, a sa θ ugao koji izvor I zaklapa sa vertikalnom osom, koja predstavlja normalu na LD. Analizirajmo za početak uopštenu situaciju kada se izvor I nalazi u proizvoljnoj tački, kao na slici (1). Očigledno je da se izvor zvuka tada nalazi bliže levom nego desnom uhu, i to za rastojanje r . Ukoliko pretpostavimo da je rastojanje od izvora do slušaoca u većini slučajeva dovoljno veće od rastojanja između ušiju slušaoca (LD), ugao LQD (slika 2) se može, za potrebe prve aproksimacije, smatrati pravim.

U tom slučaju nije teško izračunati, na osnovu jednakosti ugla QLD i ugla koji zvučni izvor zaklapa sa vertikalnom osom, kao uglova sa normalnim krakima, da putna razlika koju zvučni talas pređe do bližeg, odnosno daljeg uha, iznosi $r = x \sin \theta$. Kao direktna posledica toga možemo reći da zvuk kasni pri prijemu u dalje uho za $\Delta t = (x \sin \theta)/c$, gde je c brzina zvuka. Samim tim, fazni ugao koji formiraju fazori koji opisuju akustički pritisak na mestu levog, tj. desnog uha, iznosi:

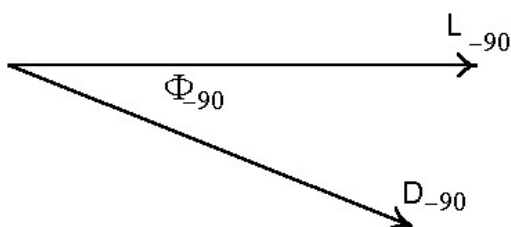
$$\Phi_{\theta} = \omega \cdot \Delta t = \omega \cdot \left(\frac{x}{c} \right) \cdot \sin \theta \quad (1)$$



Slika 2: Prikaz putne razlike zvučnih talasa na mestu slušanja

Pogledajmo sada kako izgleda međusobni odnos ovih fazora kada se izvor nalazi u nekoliko karakterističnih tačaka:

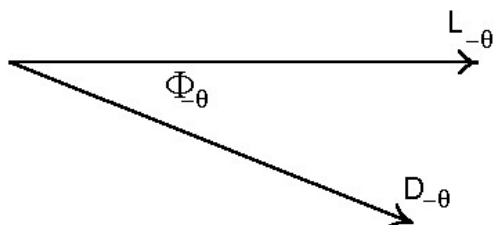
Kada je izvor u krajnjem levom položaju (tačka A na slici 1), funkcija $\Phi\theta$ ima maksimum, i tada fazor levog uha prednjači ispred fazora desnog uha za ugao $\Phi(-90)$ (slika 3), što rezultuje osećajem da zvuk dolazi do slušaoca sa leve strane.



Slika 3: Fazorski dijagram u slučaju kada je izvor u tački A

Kako se izvor pomera u smeru kazaljke na satu, funkcija Φ se smanjuje sa koeficijentom $\sin\theta$, s tim što sve vreme fazor zvučnog pritiska na levo uvo, L, prednjači u odnosu na fazor D. Izgled fazorskog dijagrama kada se izvor nalazi pod proizvoljnim uglom u odnosu na vertikalnu osu, ali u levoj poluravni u odnosu na slušaoca je prikazan na slici (4).

Kada se zvučni izvor I nađe u tački C, dakle tačno ispred slušaoca, vrednost funkcije Φ , odnosno ugao koji formiraju fazori L i D, iznosi $\Phi(0)=0$, tj. fazori L_0 i D_0 su u fazi (slika 5). S obzirom na potpunu simetriju zvučnih pritisaka na oba uha, u ovom slučaju slušalac ima osećaj da se zvučni izvor nalazi direktno ispred njega.

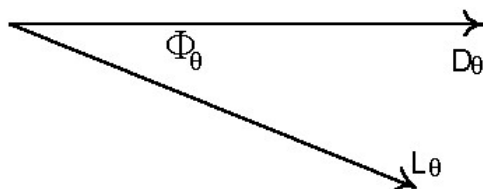


Slika 4: Fazorski dijagram za slučaj kada je izvor u proizvoljnoj tački leve poluravni u odnosu na slušaoca



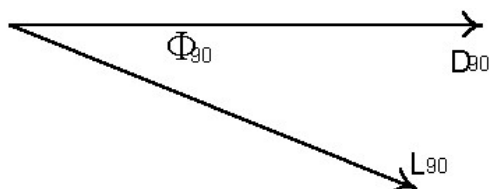
Slika 5: Fazorski dijagram za slučaj kada se izvor nalazi tačno ispred slušaoca

U nastavku kretanja zvučnog izvora od tačke C do tačke B, fazni ugao opet počinje da raste sa istim koeficijentom $\sin\theta$, s tim što ovog puta fazor desnog uha prednjači pred fazorom levog (slika 6). Rezultujući osećaj je da se izvor nalazi u slušaočevoj desnoj poluravni.



Slika 6: Fazorski dijagram za slučaj kada se izvor nalazi u proizvoljnoj tački desne poluravni

Konačno, kada se izvor nađe u krajnje desnom položaju (tačka B na slici 1), fazorski dijagram izgleda kao na slici 7, a vrednost funkcije Φ ima maksimalnu vrednost (koeficijent $\sin\theta$ dostiže svoj maksimum za $\theta = 90^\circ$), što rezultuje osećajem da zvuk dolazi sa slušaočeve desne strane.



Slika 7: Fazorski dijagram za slučaj kada se izvor nalazi u krajnje desnoj tački u odnosu na slušaoca

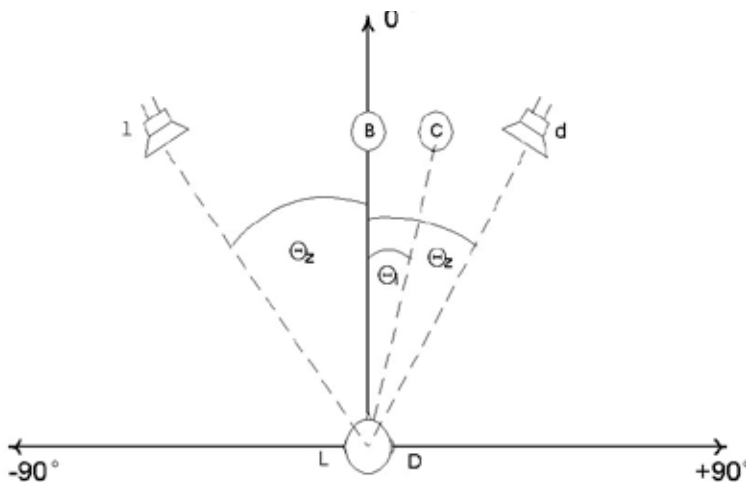
U ovim razmatranjima nismo uzeli u obzir postojanje intezitetnih razlika, koje se nikako ne smeju smetnuti sa uma, s obzirom da je, sem kada je izvor u centralnom položaju C ($\theta = 0^\circ$), intenzitet zvučnog pritiska na bližem uhu veći nego na daljem. Ova pojava je do izvesne mere posledica postojanja putne razlike (intenzitet zvuka opada obrnuto proporcionalno sa rastojanjem), ali pre svega nastaje usled difrakcije zvuka, koja se javlja oko glave slušaoca. Kao što je poznato, do difrakcije dolazi kada talas nailazi na prepreku čije su dimenzije uporedive sa njegovom talasnom dužinom, pa možemo slobodno smatrati da do frekvencija od otprilike 500-700Hz ($\lambda = c/f = 340/500 = 0.68\text{m}$) difrakcija ne igra značajniju ulogu, te da se lokalizacija zvučnog izvora u tom frekventnom opsegu odvija, pre svega, na osnovu vremenskih kašnjenja. Od 500 pa do, otprilike, 2000Hz efekat difrakcije postaje sve izraženiji, tako da i intenzitetne razlike „ulaze u igru” lokalizacije izvora. Za više frekvencije, difrakcija je dosta izražena i intenzitetne razlike postaju dominantne u procesu pozicioniranja izvora, tako da bi njihovim zanemarivanjem mogli doći do netačnih zaključaka. Zanimljivo je primetiti da, ukoliko usvojimo da rastojanje izmedju levog i desnog uha, sa uračunatom krivinom glave, retko prelazi 24cm, maksimalna vrednost kašnjenja zvuka od bližeg do daljeg uha iznosi $\Delta t = 0.24/340 = 0.7\text{ms}$. Kako u tom slučaju maksimalna fazna razlika (u tačkama A i B, gde je $\sin\theta = 1$) iznosi $\Phi_{\text{max}} = 2\pi f\Delta t$, nije teško izračunati da na frekvencijama većim od približno 700Hz dolazi do nepouzdanog određivanja pravca na osnovu faznih razlika, jer za $\Phi > \pi$ fazno prednjačenje prelazi u kašnjenje. Dakle, za sve frekvencije veće od 700Hz analiza koja ne bi podrazumevala i intezitetne razlike zvuka na mestu levog i desnog uha, sasvim sigurno ne bi davala tačne rezultate.

Pre nego što predjemo na dalju analizu, bitno je istaći dve stvari u vezi upotrebe fazora:

- Ljudsko uvo nije direktno osetljivo na fazu zvučnog talasa. Ono što je bitno za potrebe lokalizacije jesu vremenski trenuci pobudjivanja levog, odnosno desnog uha. Fazni ugao predstavlja, dakle, samo zgodno matematičko „oruđe” za opisivanje vremenskih kašnjenja, a ne direktan uzrok sposobnosti lokalizacije zvučnog izvora.
- Na osnovu jednačine (1) se lako izvodi zaključak da veličina faznog ugla direktno zavisi od frekvencije, tako da bi bilo kakva ozbiljnija analiza realnog signala morala biti sprovedena u punom frekventnom opsegu koji on zauzima.

1.2 Slušalac u polju dva zvučna izvora

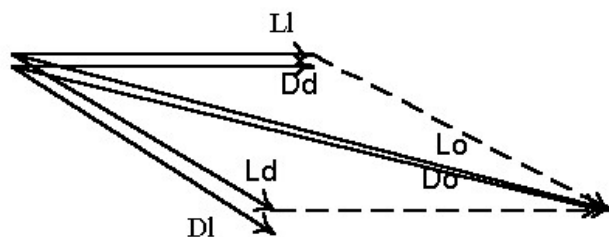
Posmatrajmo slučaj prikazan na slici (8). U ovom slučaju se slušalac nalazi na jednakom rastojanju od dva zvučna izvora (zvučnika), koji emituju signale koji su međusobno fazno korelisani:



Slika 8: Slušalac u polju dva zvučna izvora

Ukoliko je aktivan samo levi zvučnik, fazorski dijagram će biti identičan kao u situaciji kada se jedan pokretni izvor nalazi na mestu tog zvučnika. Dakle, levi fazor će biti ispred desnog, a slušalac ima oseća da zvuk dolazi sa mesta na kojem se zvučnik nalazi.

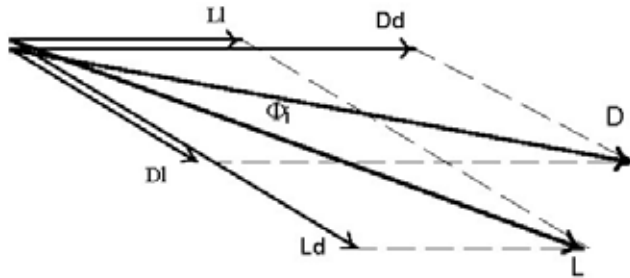
U situaciji kada oba zvučnika emituju identičan zvuk, kako po intenzitetu, tako i po fazi, fazorski dijagram se može predstaviti kao na slici (9). Indeksi l i d se odnose na levi i desni zvučnik, i označavaju fazore u zavisnosti od toga da li su posledica zvuka koji proizvodi levi ili desni zvučnik.



Slika 9: Fazorski dijagram u slučaju kada oba zvučnika emituju potpuno isti zvuk

Kao što se vidi, rezultatni fazori za levo i desno uvo, L_o i D_o , su isti i po fazi i po intenzitetu, što je analogno slučaju kada se jedan zvučni izvor nalazi direktno ispred slušaoca. I zaista, slušalac ima utisak da zvuk dolazi iz prostora između zvučnika, iz tzv. virtuelnog zvučnog izvora (u daljem tekstu VZI), koji se u ovom slučaju nalazi tačno na sredini prostora između dva zvučnika, odnosno u centru zvučne baze (tačka B na slici 8).

Razmotrimo na kraju uopšteni slučaj kada, recimo, levi zvučnik emituje signal manjeg intenziteta u odnosu na desni. Fazorski dijagram za tu situaciju je predstavljen na slici 10.



Slika 10: Fazorski dijagram za slučaj kada desni zvučnik emituje zvuk jačeg intenziteta

Kao što se vidi, rezultatni fazor koji opisuje ukupni akustički pritisak na desno uvo (koje je bliže jačem zvučniku), se nalazi ispred rezultatnog fazora za levo uvo, i to za ugao Φ_i . Kao rezultat takve situacije, virtuelni izvor se postavlja u tačku C, koja se nalazi pod uglom θ_i u odnosu na slušaoca (slika 8), u desnoj polovini zvučne baze.

Precizniju analizu pozicije u kojoj će se naći virtuelni izvor moguće je sprovesti polazeći od formule za izračunavanje faznog ugla Φ_i između rezultujućih fazora L i D , koju su izveli naučnici *Clark*, *Dutton* i *Vandeslyn* (Lit. 2), a koja glasi:

$$\Phi_i = \frac{L - D}{L + D} \cdot \frac{\omega \cdot x}{c} \cdot \sin \theta_z \quad (2)$$

U ovoj formuli L i D označavaju prosečne trenutne vrednosti zvučnih pritisaka na levo i desno uvo prilikom reprodukcije sa oba zvučnika, x je rastojanje od levog do desnog uva, dok θ_z predstavlja ugao pod kojim slušalac „vidi” zvučnike. Njenim izjednačavanjem sa jednačinom (1), uz primenu osnovnih aritmetičkih transformacija, veoma lako možemo doći do sledeće relacije:

$$\frac{L - D}{L + D} \cdot \sin \theta_z = \sin \theta_i \quad (3)$$

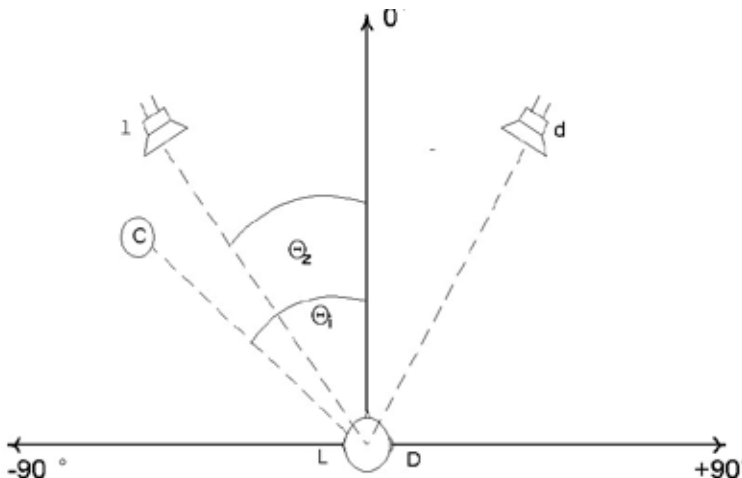
Ukoliko sa S_l i S_d označimo snage koje se privode levom, tj. desnom zvučniku, i ukoliko znamo da važi da su one proporcionalne sa L i D ($L=kS_l$ i $D=kS_d$), možemo definitivno pisati:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_z} = \frac{S_l - S_d}{S_l + S_d} \quad (4)$$

Ovo je tzv. sinusni zakon stereofonije koji povezuje snage signala koje privodimo levom i desnom zvučniku (S_l i S_d), ugao koji zvučnici zauzimaju u odnosu na slušaoca (θ_z) i položaj virtuelnog izvora (oličen kroz ugao θ_i koji VZI zauzima u odnosu na slušaoca). Posmatrajući ovu formulu možemo doći do veoma značajnog zaključka da odgovarajućom intenzitetnom raspodelom signala na levi i desni kanal možemo smestiti virtuelni izvor u bilo koju tačku zvučne baze, i na taj način ga direktno pozicionirati na željeno mesto u okviru zvučne slike. Upravo na tom principu se i zasniva sistem tzv. intenzitetne stereofonije.

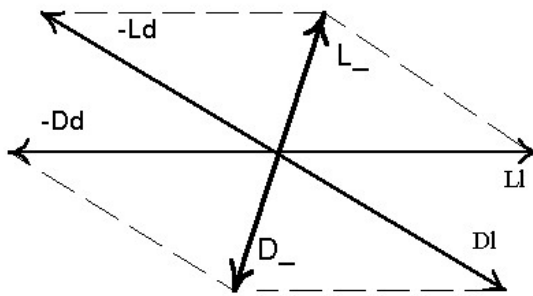
1.3 Reprodukcijska fazno pomerenih signala

Pozabavimo se sada zanimljivom situacijom koja nastaje prilikom reprodukcije jednog signala koji se nalazi u različitim fazama u levom, tj. desnom kanalu. Ukoliko se u situaciji prikazanoj na slici (11) vrši reprodukcija signala istim intenzitetima preko oba kanala, očigledno je da će obrtanje faze za 180° jednog od njih, recimo desnog, dovesti i do obrtanja samih fazora koji opisuju reprodukciju sa desnog zvučnika, L_d i D_d .



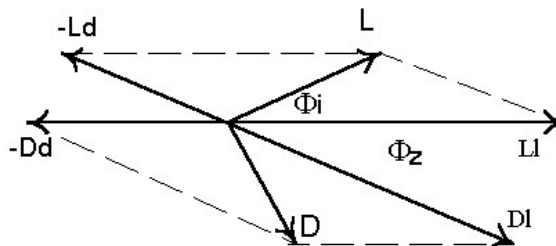
Slika 11: Reprodukcijska fazno nekorelisanih signala

Na taj način fazori D_d i L_d postaju $-D_d$ i $-L_d$. Rezultujući fazori na mestu levog i desnog uha, obeleženi kao $-L$ i $-D$, biće potpuno identični po dužini, ali postavljeni pod uglom od 180° jedan u odnosu na drugi, nezavisno od same frekvencije koju emituje zvučni izvor (slika 12). Čovek jednostavno nije opremljen informacijom koja bi trebalo da mu pomogne da se snađe, tj. odredi pravac zvučnog izvora u takvoj situaciji, jer ona nije „prirodna”, tako da dolazi do dezorijentacije. Efekti koji se javljaju prilikom ovakve reprodukcije su višestruki, i u velikoj meri zavise od uslova slušanja, ali se vrlo često dešava da slušalac ima osećaj „pritiska u ušima” ili utisak da mu zvuk dolazi iz glave. Ova činjenica se ponekad koristi za kreiranje specijalnih efekata, ali se u većini slučajeva dešava da do nje dođe greškom, usled pogrešnog procesiranja signala.



Slika 12: Fazorski dijagram za slučaj reprodukcije identičnih, ali fazno suprotno orijentisanih signala u levom i desnom kanalu

U slučaju kada su protivfazni signali u levom i desnom kanalu različitih intenziteta, takođe dolazi do zanimljivih pojava. Ukoliko pogledamo sliku (13), koja prikazuje fazorski dijagram koji opisuje situaciju koja nastaje kada je levi signal jači od desnog, pri čemu signal desnog kanala ima obrnutu fazu, videćemo da fazori D_d i L_d postaju $-D_d$ i $-L_d$, dok rezultatni ugao između fazora L i D (Φ_i), postaje veći od faznog ugla koji je posledica reprodukcije zvuka sa svakog zvučnika ponaosob (Φ_z). Upravo ova činjenica nam „predviđa” da će se VZI smestiti negde van granica zvučne baze, što se u praksi zaista i dešava. Dakle, odgovarajućom intenzitetnom raspodelom protivfaznih signala na levi i desni kanal bi trebalo da bude moguće pozicionirati VZI u bilo koju tačku prostora, nevezano za granice zvučne baze, koje su određene samim položajem zvučnika.



Slika 13: Fazni dijagram za slučaj kada se reprodukuju fazno pomereni signali, nejednaki po intenzitetu

Ukoliko se vratimo na sinusni zakon stereofonije (jednačina 4), i ukoliko predpostavimo da signal desnog kanala ima obrnutu fazu, možemo veličinu S_d smeniti sa $-S_d$, čime ta jednačina dobija sledeći oblik:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_z} = \frac{S_l + S_d}{S_l - S_d} \quad (5)$$

Sređivanjem ovog izraza se dobija:

$$\frac{S_d}{S_l} = \frac{\sin \theta_i - \sin \theta_z}{\sin \theta_i + \sin \theta_z} \quad (6)$$

S obzirom da maksimalna vrednost ugla θ_i , pod kojim se može nalaziti VZI u odnosu na slušaoca, iznosi 90° , izraz $\sin \theta_i$ ne može biti veći od 1. Ukoliko bismo želeli da postavimo VZI baš pod uglom od 90° u odnosu na slušaoca, odnos intenziteta fazno suprotnih signala u levom i desnom kanalu bi trebalo da iznosi:

$$\frac{S_d}{S_l} = \frac{1 - \sin \theta_z}{1 + \sin \theta_z} \quad (7)$$

Na osnovu tog izraza nije teško izračunati da, ukoliko su zvučnici postavljeni pod uglom od $\theta_z = 30^\circ$ u odnosu na slušaoca, maksimalni dozvoljeni odnos intenziteta signala u fazi i protivfazi, potreban za smeštanje VZI pod uglom od 90° , iznosi $(1-0.5)/(1+0.5) = 0.333$. Slično tome, ukoliko su zvučnici pod uglom od 45° , taj odnos iznosi $S_d/S_l = 0.17$. Za odnose koji su manji od ovih maksimalnih, VZI se smešta pod uglovima manjim od 90° .

Zanimljivo je razmotriti i uticaj faznih pomeraja manjih od 180° , identičnih signala u levom i desnom kanalu koji se reprodukuju istim intezitetima, na lokalizaciju VZI. Ukoliko je fazni pomeraj u granicama od 0° do, otprilike, 135° , dolazi do proširivanja VZI. Naime, gubi se osećaj da on dolazi iz jasno definisane tačke, ili dela prostora, i čini se da zauzima veliki prostor ispred samog slušaoca. Takođe dolazi i do različitih uticaja na frekventni sadržaj signala, koji se razlikuju od frekvencije do frekvencije. Na nekima od njih dolazi do delimičnog, ili potpunog, sabiranja signala iz levog i desnog kanala, dok na drugim dolazi do potiranja. Kako se fazni pomeraj povećava i preko 135° , zvučna slika se sve više razliva, što dovodi do osećaja da se ona „raspada”. Konačno, fazni pomeraj od 180° dovodi do već opisanog efekta „zvuka iz glave”.

PITANJA ZA PROVERU ZNANJA

1. Šta su to intenzitetne, a šta fazne razlike do kojih dolazi u procesu binauralnog slušanja?
2. Na koji način se vrši lokalizacija zvučnog izvora?
3. U kom opsegu frekvencija dominantnu ulogu u procesu lokalizacije imaju fazne, a u kom intenzitetne razlike?
4. Kako glasi sinusni zakon stereofonije?
5. Šta je to zvučna baza?
6. Šta je to virtuelni zvučni izvor (VZI)?
7. Na koji način je u sistemima dvokanalne stereofonije moguće VZI smestiti van granica zvučne baze?

OSNOVNI PRINCIPI FORMIRANJA STEREO ZVUČNE SLIKE

II deo

Muzika je umetnost koja se izvodi u vremenu, u situacijama sa ili bez auditorijuma. Iako to nije u svakom slučaju situacija (npr. u elektronskoj muzici), muzika se beleži njenim snimanjem, pa se može reći da je temelj kvalitetne zvučne slike, pre svega, baziran na pravilnoj upotrebi mikrofona. Od načina postavke i vrste korišćenih mikrofona zavise ne samo njen konačan izgled (u smislu zvučanja), već i celokupan utisak koji neko ima prilikom slušanja. Pravilno razumevanje mogućnosti koje pružaju mikrofonske tehnike u velikoj meri olakšava sve faze poslova u postupcima muzičke produkcije. Iz tih razloga, drugi deo ovog udžbenika je posvećen razmatranju klasičnih mikrofonskih tehnika, koje spadaju u bazične principe formiranja stereo zvučne slike. Prvi deo ove celine je posvećen podsećanju na osnovne vrste i karakteristike mikrofona. Nakon toga je razmotrena upotreba koincidentnog mikrofonskog stereo para, pri čemu su posebno analizirane X-Y i M-S postavke. Posebna pažnja je posvećena analizi svake od ovih postavki u zavisnosti od tipova korišćenih mikrofona. Sledeća oblast u okviru ove celine je analiza takozvanih "*spaced-apart*", odnosno prostorno razdvojenih postavki. Nakon toga je ukazano na neke od mogućnosti kombinovanja različitih tehnika, što predstavlja i neku vrstu uvoda u poslednji analizirani tip postavke mikrofona, tzv. "*close miking*". Poglavlje je u tom smislu podeljeno u sledeće celine:

1. Tehnike stereofonskog snimanja zvuka
2. Akustička podela mikrofona
3. Koincidentne stereo postavke
10. Razdvojene tehnike
11. *Decca-tree* postavka
12. ORTF i NOS postavke
13. Kombinovane tehnike

2.1 Tehnike stereofonskog snimanja zvuka

Od samog početka primene stereo sistema, ljudi su eksperimentisali sa načinima i tehnikama postavke mikrofona, koje su za cilj imale da obezbede što verniju rekonstrukciju originalne zvučne slike prilikom reprodukcije. U tim manje ili više uspešnim pokušajima, iskristalisalo se par sada već „klasičnih” pristupa, čija primena zavisi od konkretne namene i situacije. Neke tehnike omogućuju bolje očuvanje prirodnosti i atmosfere, neophodne za snimanje npr. klasične muzike, dok su druge usavršene za potrebe snimanja nekih modernijih muzičkih formi.

„Klasične” stereo postavke podrazumevaju korišćenje dva mikrofona putem kojih se formira zvučna slika u celini, i dele se na tzv. koincidentne i prostorno razdvojene (od engleskog „spaced-apart”) tehnike. Kao poseban pristup problemu formiranja zvučne slike bi se mogla izdvojiti tzv. „close miking” tehnika, kod koje se koristi više mikrofona postavljenih blizu zvučnih izvora, sa ciljem da svaki mikrofon „hvata” samo određeni instrument (ili grupu instrumenata), čiji se položaj u ukupnoj zvučnoj slici naknadno rekonstruiše odgovarajućim metodama. Pa ipak, verovatno najčešći pristup u svakodnevnoj snimateljskoj praksi predstavljaju upravo kombinacije svih raspoloživih tehnika i metoda, sa jednim ciljem: napraviti što „lepšu” zvučnu sliku.

Kao što smo već objasnili, mogućnost pozicioniranja VZI u horizontalnoj ravni (levo-desno) zvučne baze je posledica ili razlike u intenzitetu reprodukcije između levog i desnog kanala ili različitih vremenskih trenutaka u kojima reprodukcija jednog takvog zvučnog izvora započinje, ili, u krajnjem slučaju, kombinacije ova dva faktora. Zamislimo za trenutak

slušaoca koji se nalazi u klasičnoj postavci stereo reprodukcije, pod kojom ćemo u daljem tekstu podrazumevati situaciju kada se glava slušaoca i dva zvučnika nalaze u temenima zamišljenog jednakostraničnog trougla. Maksimalni ugao θ_i koji u tom slučaju VZI može zauzimati u odnosu na slušaoca iznosi 30 stepeni, a određen je samim položajem zvučnika, koji se mogu smatrati krajnjim tačkama zvučne baze. (U principu je moguće, na način objašnjen u glavi 1.3 virtualni izvor smestiti i van ovih granica, ali za sada ta mogućnost neće biti uzimana u razmatranje). Postavlja se pitanje koliko zaista treba da iznose intenzitetne ili vremenske međukanalne razlike, da bi se, kao njihova posledica, VZI pojavio na željenom mestu u okviru zvučne baze. Na ovo pitanje bi se odgovor, u principu, mogao potražiti i iz sinusnog zakona stereofonije (jednačina 4), ali ćemo se, iz praktičnih razloga, koristiti eksperimentalnim rezultatima. Za potrebe tog eksperimenta su korišćeni monofonski signali, čija je reprodukcija vršena preko klasičnog stereo sistema. Eksperiment se sastojao u modifikacijama ovakvog signala, koje su bile ograničene na osnovne promene intenziteta, ili kašnjenja, u jednom u odnosu na drugi kanal. Slušaoci su bili zamoljeni da lociraju položaj VZI pri svakoj novoj promeni, a neki od na taj način dobijenih rezultata su prikazani u tabeli (1).

Pozicija VZI	Intenzitetne razlike (DI) za $D_t = 0$	Vremenske razlike (D_t) za $D_I = 0$
0°	0 dB	0 mS
10°	2.5 dB	0.2 mS
20°	5.5 dB	0.44 mS
30°	15 dB	1.12 mS

Tabela 1: Intenzitetne i vremenske međukanalne razlike potrebne za smeštanje VZI pod određenim uglom u odnosu na slušaoca

Kao što je i bilo za očekivati, pozicioniranost VZI pod uglom od 0° (na sredini zvučne baze) je ostvarena kada su oba kanala identična, i u intenzitetnom i u vremenskom smislu. Povećavanje intenziteta jednog od kanala za 2.5 dB (pri čemu se „vremenski odnos” između kanala održava konstantnim) pomera VZI 10 stepeni od centra, ka „jačem” zvučniku. Isti efekat se postiže i kada se međusobni intenziteti održavaju na istom nivou, a jedan kanal se zakasni u odnosu na drugi za 0.2 mS, pri čemu se VZI pomera ka „nezakašnjenom” zvučniku. Vrednosti vremenskih i intenzitetnih razlika potrebnih za smeštanje VZI pod uglovima od 20 i 30 stepeni su prikazani u tabeli 1.

Pre nego što pokušamo da dovedemo u vezu ove rezultate sa praktičnim metodama koje omogućuju njihovu primenu, podsetićemo se osnovnih stvari vezanih, pre svega, za polarne karakteristike mikrofona.

2.2 Akustička podela mikrofona

Kada se mikrofon nalazi u zvučnom polju, javlja se, usled promene zvučnog pritiska, naizmenična sila koja deluje na membranu. U zavisnosti od toga koja akustička veličina izaziva ovu promenu, izvršena je tzv. akustička podela mikrofona, koja podrazumeva postojanje dva osnovna tipa:

- Mikrofon koji radi na pritisak (presioni mikrofoni), i
- Mikrofon koji radi na gradijent (razliku) pritiska (dvosmerni mikrofoni).

Membrana mikrofona koji radi na pritisak je izložena dejstvu zvučnih talasa samo sa jedne strane. S obzirom da je pritisak skalarna veličina koja nema pravac i smer delovanja, osetljivost ove vrste mikrofona je nezavisna od ugla pod kojim zvučni talas dolazi do njih. Iz tog razloga njihova karakteristika direktivnosti je teorijski kružnog oblika, pa se često kaže da se radi o nedirektivnim, odnosno omnidirekcionim mikrofonom. Jednačina kojom se opisuje njihova osetljivost S glasi:

$$S = 1 \quad (8)$$

Mikrofon koji radi na gradijent pritiska reaguje na razliku pritiska koji deluju na prednju i zadnju stranu membrane. Kako je razlika pritiska, a samim tim i pomeraj membrane, najveći kada se izvor nalazi tačno ispred ili tačno iza mikrofona, možemo zaključiti da je njihova osetljivost najveća kada se zvučni izvor nalazi upravo u ovim tačkama. S druge strane, njihova membrana neće moći da se kreće ($S = 0$) kada se izvor nalazi pod uglom od $\pm 90^\circ$, jer tada vlada potpuna simetrija i nema nikakve razlike među pritiscima. Ukoliko sa 'a' označimo ugao incidencije zvuka, izraz za osetljivost ove vrste mikrofona se može pisati kao:

$$S = \cos a \quad (9)$$

Karakteristika direktivnosti ovog tipa mikrofona je dvosmerna, i može se predstaviti u obliku „osmice”, s tim što je neophodno imati na umu postojanje fazne razlike od 180° u zavisnosti od toga da li se izvor nalazi ispred ili iza mikrofona.

Kombinacijom ove dve vrste mikrofona, odnosno sabiranjem njihovih izlaznih e.m.s. u odgovarajućim odnosima, moguće je realizovati mikrofone različitih karakteristika usmerenosti, koje se mogu opisati uopštenom jednačinom:

$$S = B + (1 - B) \cos a \quad (10)$$

U ovoj jednačini B označava odnos između omni i bidirekcionih komponenti i ima vrednost između 0 i +1. Konkretni vrednosti ove veličine za pet najčešće korišćenih mikrofonskih karakteristika, kao i rezultatni izrazi koji opisuju njihovu osetljivost S, su prikazane u tabeli (2).

Polarna karakteristika usmerenosti		Jednačina osetljivosti [$B + (1 - B) \cos(a)$]
Omnidirekciona	(B = 1)	$1.00 + 0.00 \cos(a)$
Subdirekciona	(B = 0.75)	$0.75 + 0.25 \cos(a)$
Kardioidna	(B = 0.5)	$0.50 + 0.50 \cos(a)$
Bidirekciona	(B = 0)	$0.00 + 1.00 \cos(a)$

Tabela 2: Osetljivost pet najčešće korišćenih vrsta mikrofona

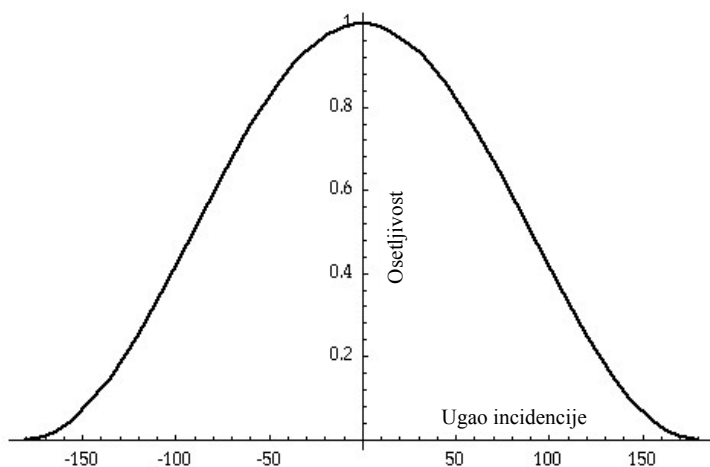
Na osnovu ovih formula je vrlo jednostavno naći osetljivost bilo kog tipa mikrofona u odnosu na njegovu „centralnu” osetljivost, odnosno osetljivost pod uglom od 0° , u funkciji incidentnog ugla ‘a’. Razlika ovih osetljivosti izražena u decibelima se računa kao:

$$D[dB] = 20 \log \frac{\text{osetljivost na osi}}{\text{osetljivost van ose}} \quad (11)$$

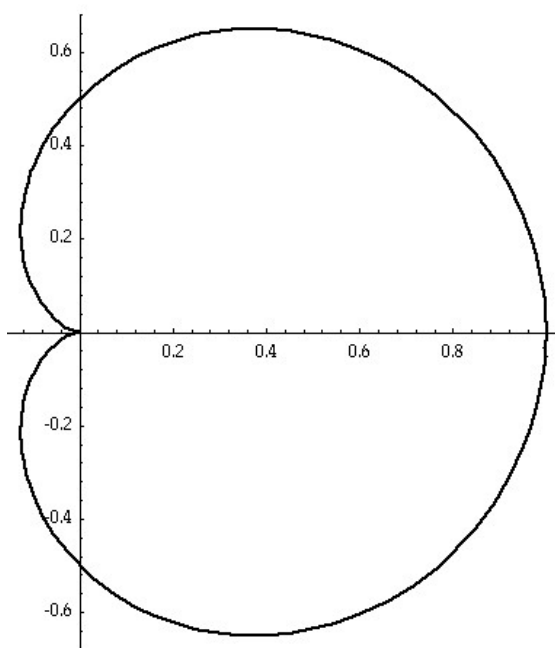
Primenom jednačine iz tabele 2 na sve uglove incidencije oko kardioidnog mikrofona, možemo doći do grafika prikazanog na slici 14. U ovom slučaju x-osa predstavlja ugao pod kojim dolazi zvuk, dok y-osa reprezentuje osetljivost samog mikrofona.

Kao što se sa grafika može videti, kardioidni mikrofoni imaju osetljivost $S=1$ za ugao incidencije od 0° (na osi), dok je za izvore koji se nalaze pod uglom od 180° ovaj mikrofoni praktično neosetljiv, tj. $S=0$. Ovakva vrsta grafika se mnogo češće predstavlja u obliku polarne karakteristike, koja je prikazana na slici 15.

Ovakav način prikazivanja karakteristike direktivnosti podrazumeva da je mikrofoni usmeren u pravcu centralne ose (na ovoj slici „u desno”) i da je osetljivost u tom pravcu maksimalna ($S=1$), dok se osetljivost mikrofona za određeni ugao, normalizovana na osetljivost u odnosu na centralnu osu, predstavlja rastojanjem od centra grafika do tačke na samom grafiku.



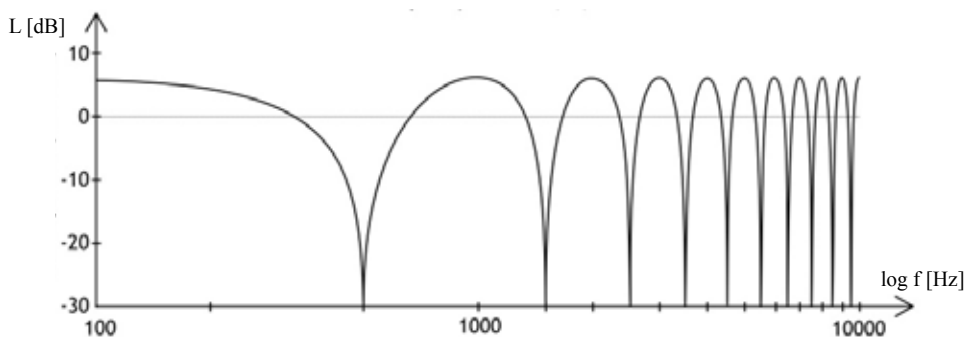
Slika 14: Osetljivost kardiodnog mikrofona



Slika 15: Polarna karakteristika usmerenosti kardiodnog mikrofona

2.3 Koincidentna stereo postavka

Postavljanje mikrofona za potrebe stereo snimanja određene zvučne scene predstavlja veoma kompleksan problem, čije rešavanje ne podleže egzaktno utvrđenim pravilima. Osnovno polazište se svakako nalazi u činjenici da je za potrebe takvog snimanja neophodno imati minimalno dva mikrofona – jedan „zadužen” za levi, a drugi za desni kanal. Jedan od osnovnih problema vezanih za upotrebu više od jednog mikrofona prilikom snimanja je u tome što zvučni talas do svakog od njih dolazi u različitim vremenskim trenucima, što neminovno dovodi do promena u zvuku. Naime, rezultatni signal će u takvom slučaju predstavljati zbir fazno pomerenih signala, koji će se na nekim frekvencijama, delimično ili potpuno, potirati, dok će se na nekim drugim frekvencijama sabirati. Ova kašnjenja u praksi su veoma mala (ponekad čak i ispod 1ms), i ljudsko uvo ih pre svega oseća kao promenu u boji samog tona. Ovaj efekat je poznat pod imenom „comb - filter” (od engleskog „comb” - češalj), koji je takvo ime dobio zbog karakterističnog izgleda rezultujućeg signala, koji često podseća na češalj (slika 16).

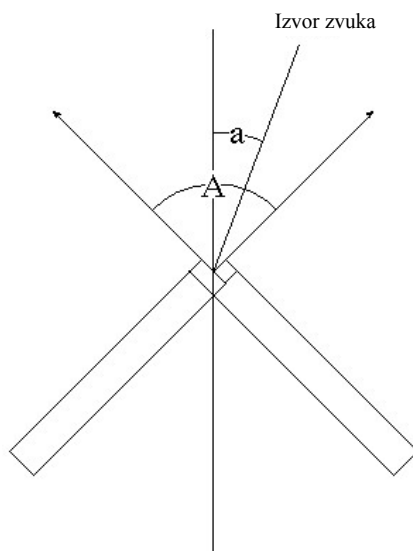


Slika 16: Karakterističan izgled „comb-filter” funkcije.
Na frekvencijama $f_n = n/2T$ ($n = 1, 3, 5, \dots$) dolazi do potiranja direktnog i zakašnjenog signala, pri čemu je T vreme kašnjenja izraženo u sekundama.

Koincidentne postavke mikrofona su razvijene pre svega iz potrebe za prevazilaženjem takvih problema. Generalna ideja se sastoji u tome da se membrane oba korišćena mikrofona dovedu u što je moguće bliskiji položaj, čime bi se obezbedilo da zvuk do svake od njih pristiže u praktično istom trenutku. Kako je nemoguće smestiti obe membrane u istu tačku prostora, najčešće se pribegava njihovom postavljanju jedne iznad druge. Time se najpribližnije simulira ekvidistantnost svih zvučnih izvora do obe membrane, jer je u tom slučaju vreme prispeća zvuka pod bilo kojim uglom iz horizontalne ravni (a logično je pretpostaviti da se zvučna scena formira pre svega po „širini”) do oba mikrofona praktično identično. U tom slučaju, stereo slika se formira isključivo na osnovu razlike intenziteta izlaznih e.m.s. ova dva mikrofona. To je moguće pre svega zahvaljujući usmerenosti korišćenih mikrofona, što

dovodi do toga da zvuk iz jednog zvučnog izvora svaki od mikrofona "tumači" na svoj način, u zavisnosti od sopstvene karakteristike direktivnosti i ugla koji takav izvor zauzima u odnosu na njegovu centralnu osu. Kao posledica toga, ova postavka isključuje mogućnost upotrebe nedirektivnih mikrofona.

Pozicioniranost VZI u zvučnoj slici, dakle, u celini zavisi od vrste korišćenih mikrofona, ali i, u velikoj meri, od ugla koji njihove centralne ose međusobno zaklapaju. Ovaj ugao se u engleskoj literaturi označava kao „included angle”, dok ćemo na ovom mestu koristiti izraz postavni ugao, za čije ćemo označavanje u nastavku teksta koristiti oznaku 'A'.



Slika 17: Koincidentna postavka mikrofona. 'A' označava postavni ugao, dok 'a' označava ugao incidencije zvučnog talasa.

U zavisnosti od toga na koji način se tretiraju izlazni signali iz svakog od mikrofona, koincidentne stereo postavke se generalno mogu podeliti u dve grupe:

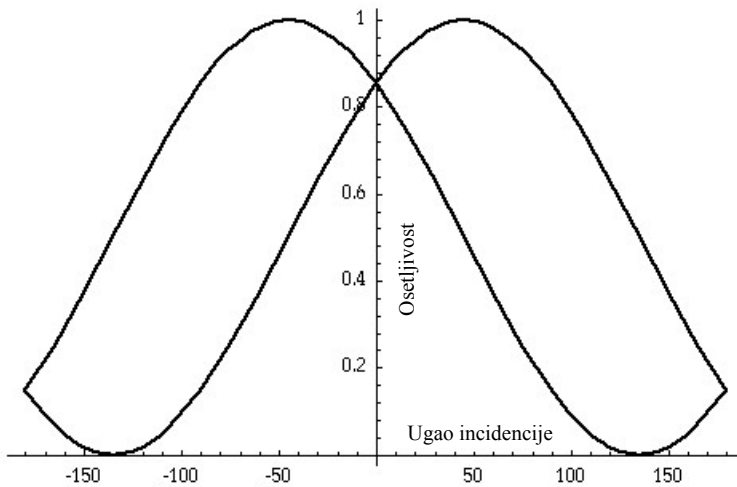
- X-Y postavka, kod koje se izlazni signali iz oba mikrofona direktno vode u levi, tj. desni kanal, pri čemu se mikrofoni „zadužen” za levi kanal označava sa „X”, dok se desni mikrofoni označava sa „Y”.
- M-S postavka (od engleskog Mid-Side), kod koje izlazni signali iz oba mikrofona podležu određenoj transformaciji, pre nego što se pošalju u levi, tj. desni kanal.

U nastavku teksta ćemo izvršiti detaljniju analizu svake od ovih postavki, i to pre svega u svetlu različitih vrsta korišćenih mikrofona i njihovih postavnih uglova.

2.3.1 X - Y postavka

Kardioidni par

Posmatrajmo par identičnih mikrofona sa kardioidnim karakteristikama direktivnosti, koji formiraju postavni ugao od 90° . U tom slučaju će jedan mikrofon biti usmeren 45° ulevo, a drugi 45° udesno od centralne ose stereo para posmatranog kao celine. Drugim rečima, ukoliko usvojimo da su uglovi desno od ose pozitivni, a oni levo od ose negativni, levi mikrofon je pod uglom od -45° , dok je desni mikrofon usmeren pod uglom od $+45^\circ$. Karakteristike osetljivosti ova dva mikrofona su prikazane na slici 18.



Slika 18: Osetljivost bidirekcionih mikrofona koji formiraju koincidentni par sa postavnim uglom od 90°

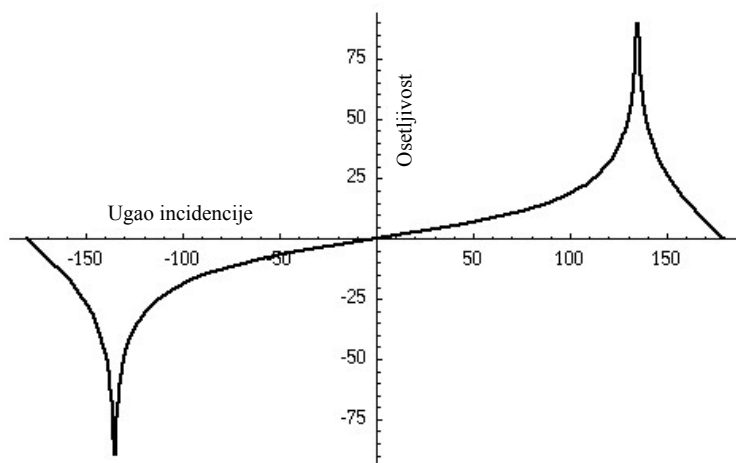
Kao što smo već napomenuli, pozicija VZI u horizontalnoj ravni zvučne baze je u potpunosti određena razlikom intenziteta u levom i desnom kanalu. Ukoliko proračunamo osetljivost ovakvog para u odnosu na različite uglove koje prema njihovoj zajedničkoj osi zauzima nekakav zvučni izvor, bićemo u stanju da nađemo i razliku njihovih izlaznih e.m.s., a samim tim i da odredimo virtualni položaj koji će takav zvuk zauzimati u okviru zvučne baze prilikom reprodukcije. Primenimo na situaciju sa slike (17) sledeću jednačinu, koja opisuje razliku osetljivosti levog i desnog mikrofona, izraženu u decibelima:

$$D[dB] = 20 \log \frac{0.5 + 0.5 \cos\left(\frac{A}{2} - a\right)}{0.5 + \cos\left(\frac{A}{2} + a\right)} \quad (12)$$

Za vrednost postavnog ugla od 90° poslednja jednačina postaje:

$$D[dB] = 20 \log \frac{0.5 + 0.5 \cos(45^\circ - a)}{0.5 + 0.5 \cos(45^\circ + a)} \quad (13)$$

Uvrštavanjem svih vrednosti incidentnih uglova 'a' od -180° do $+180^\circ$ u poslednji izraz, možemo doći do sledećeg grafika:

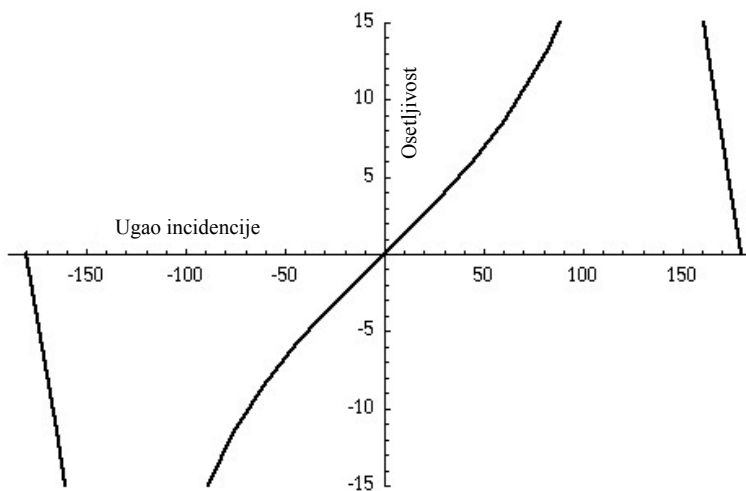


Slika 19: Amplitudska razlika izlaznih signala levog i desnog mikrofona u koincidentnom kardioidnom paru sa postavnim uglom od 90° (izražena u dB), u zavisnosti od ugla incidencije zvučnog talasa

Ovaj grafik nam nudi prikaz razlike intenziteta izlaznih signala iz oba mikrofona (izraženih u decibelima) u funkciji od ugla incidencije, tj. ugla koji zauzima zvučni izvor prema centralnoj osi mikrofonskog para. Pozitivni rezultati ukazuju na uglove incidencije za koje desni kanal ima jači intezitet, a negativni obrnuto.

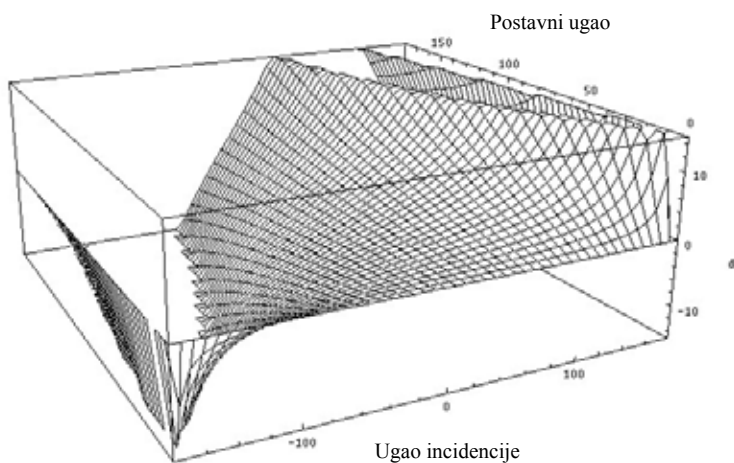
Maksimum i minimum grafa odgovaraju tačkama u kojima je odziv jednog od mikrofona ravan nuli. S obzirom da kardioidni mikrofoni pod uglom od 180° imaju osetljivost ravnu nuli, te da je, sledstveno tome, međukanalna razlika intenziteta u tim tačkama, izražena u decibelima, praktično beskonačna, grafik ima veoma oštre ekstremne pikove.

Ukoliko se vratimo na tabelu (1), videćemo da 15 dB razlike intenziteta između levog i desnog kanala praktično smešta VZI pod uglom od 30° u odnosu na slušaoca, tj. stiće se utisak da celokupan zvuk dolazi iz jačeg zvučnika. Razlike veće od 15 dB ne dovode do daljeg pomeranja, pa iz tog razloga možemo redukovati gornji graf, i koncentrisati se samo na prvih 15 dB međukanalne intezitetne razlike (slika 20).



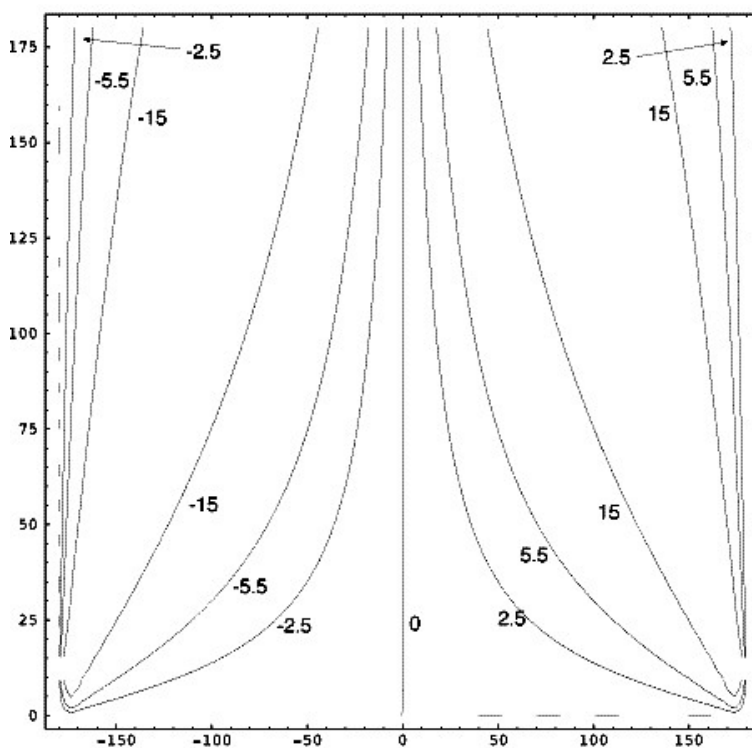
Slika 20: Uveličani detalj sa slike 19, koji odgovara opsegu amplitudskih razlika X i Y signala do granice od 15dB

Do sada smo posmatrali par mikrofona sa postavnim uglom od 90° . Slično incidentnom uglu, i ovaj ugao možemo varirati, i to u opsegu od 0° do 180° . Rezultati promene postavnog ugla se mogu prikazati u obliku 3D grafa na slici 21, s tim što treba shvatiti da grafik na slici 19 praktično predstavlja samo jedan njegov „isečak”, određen postavnim uglom od 90° . Na ovom grafiku x-osa predstavlja incidentni ugao, y-osa (vertikalna) predstavlja razliku inteziteta između levog i desnog kanala, dok se na z-osi nalaze postavni uglovi mikrofonskog para.



Slika 21: Trodimenzionalni grafik amplitudske razlike izlaznih signala X i Y mikrofona u kardiodnom koincidentnom paru, za sve vrednosti postavnih i incidentnih uglova od 0° do 180°

Ovako prikazan grafik nam daje relativno uopštenu sliku odziva ovog stereo para, ali sam njegov format nije previše praktičan za izvlačenje nekih detaljnijih zaključaka. Ukoliko se skoncentrišemo samo na „bitne” tačke na y-osi, koji prema tabeli jedan iznose 2.5 dB, 5.5 dB i 15 dB, možemo formirati novi grafik koji sadrži 7 krivih koje uspostavljaju vezu između postavnih i koincidentnih uglova potrebnih za formiranje karakterističnih intenzitetnih razlika (slika 22).



Slika 22: Konturni crtež koji prikazuje karakteristične međukanalne intenzitetne razlike (u dB), u zavisnosti od incidentnog i postavnog ugla

Ovaj graf nam ukazuje na nekoliko zanimljivih stvari. Prvo, ukoliko posmatramo situaciju u kojoj postavni ugao iznosi 90° možemo doći do zaključka da pozicioniranost VZI u zvučnoj bazi pod uglovima od 10° , 20° i 30° (tj. međukanalne intezitetne razlike od 2.5 dB, 5.5 dB i 15 dB respektivno), predstavlja direktnu posledicu činjenice da se originalni zvučni izvor na mestu snimanja nalazio pod uglovima od 20° , 41° i 89° respektivno, u odnosu na koincidentni par. Dakle, zvuk koji dolazi do stereo para pod incidentnim uglom od 20° će se javiti u zvučnoj slici pod uglom od 10° u odnosu na slušaoca; zvuk koji ima incidentni ugao od 41° će se postaviti pod uglom od 20° pri reprodukciji, dok se izvor pod incidentnim uglom

od 89° javlja pod uglom od maksimalnih 30° u odnosu na slušaoca. Prema tome, bez obzira što su pravci od 10° , 20° i 30° u okviru zvučne baze podjednako razdvojeni korakom od 10° , ta rastojanja ne odgovaraju podjednakim rastojanjima na mestu snimanja. Iz tog razloga, prilikom snimanja relativno široke zvučne scene (kao što je npr. simfonijski orkestar) ovakvim stereo parom, dolazi do pomeranja zvučne slike ka levom i desnom kraju stereo baze (ka zvučnicima), s obzirom na činjenicu da prostor od 0° do 20° na sceni, zauzima prostor od 0° do 10° prilikom reprodukcije, dok višestruko veći prostor originalne zvučne scene (od 41° do 89°), popunjava isti fizički prostor zvučne baze, samo u drugom području, bliže zvučnicima. To je poznati stereofonski ZOOM efekat, koji se često u literaturi obeležava i kao efekat distorzije uglova.

Kao drugu važnu osobinu koje treba biti svestan prilikom korišćenja ove tehnike, možemo pomenuti činjenicu da karakteristika osetljivosti kardiodnih mikrofona pokriva i zvučne izvore koji se nalaze „iza” mikrofona. Ukoliko opet posmatramo slučaj koji nastaje pri korišćenju postavnog ugla od 90° , primetićemo da se VZI pod uglovima od 10° , 20° i 30° u zvučnoj bazi javljaju i pri snimanju izvora koji se nalaze pod uglovima incidencije od 176° , 173° i 161° respektivno.

Na osnovu toga možemo odrediti granice incidentnih uglova u kojima se mora nalaziti zvučni izvor prilikom snimanja, da bi se prilikom reprodukcije njegov virtuelni par našao u krajnje levom, odnosno desnom delu zvučne baze, tj. na mestu zvučnika. S obzirom da takav slučaj nastupa za sve intenzitetne međukanalne razlike veće od 15 dB, jasno je da će se svi zvučni izvori koji se nalaze između 89° i 161° u odnosu na mikrofonski par javiti na mestu zvučnika prilikom reprodukcije. Slično kao i kod frontalno postavljenih izvora, i prilikom snimanja pozadinskih zvukova dolazi do njihove neravnomerne raspoređenosti u okviru zvučne baze, tj. do efekta distorzije uglova.

Analizirani grafik sa slike 22 nam omogućava i da uporedimo karakteristike koincidentnog para u zavisnosti od veličine postavnog ugla. Uzimajući u obzir vrednosti od 50° do 135° (sa korakom od 5°), možemo formirati tabelu 3, koja nam daje, na vrlo pregledan način, informacije o tome pod kojim upadnim uglom treba da se nalaze zvučni izvori, da bi se njihovi virtuelni parovi javili u zvučnoj bazi pod uglovima od 10° , 20° ili 30° .

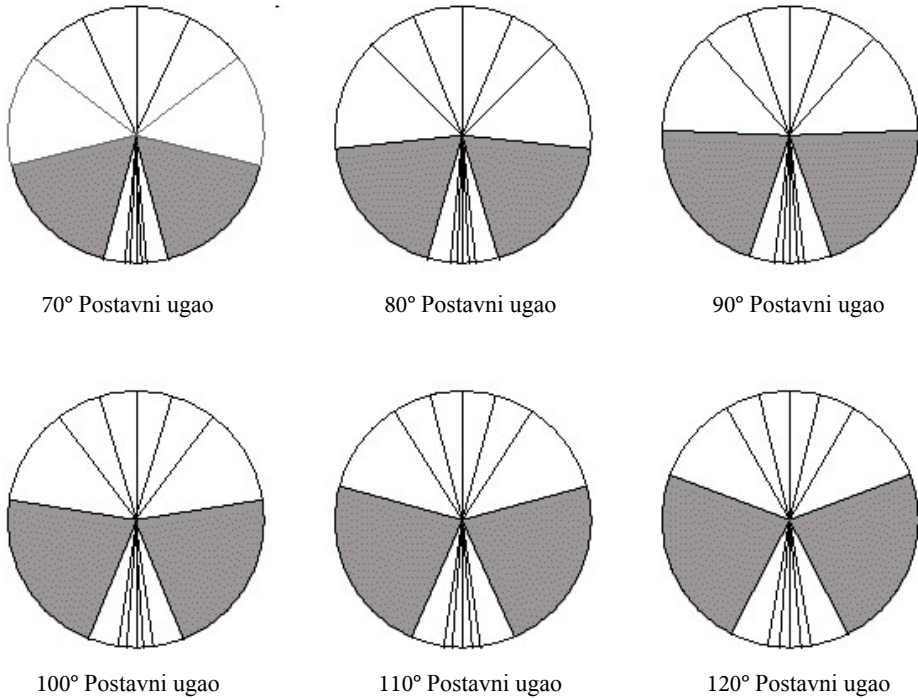
Tako na primer, da bi se VZI locirao pod uglom od 20° u odnosu na slušaoca, realan zvučni izvor prilikom snimanja bi trebalo da se, kao što smo već istakli, nalazi na 41° od centralne ose stereo para, u slučaju da postavni ugao iznosi 90° . Da bi postigli da se VZI nalazi u istoj tački zvučne baze, ali u slučaju kada postavni ugao iznosi 120° , realni zvučni izvor bi trebalo da bude lociran 30° od ose.

Položaj VZI	10°	20°	30°	30°	20°	10°
Postavni ugao	2.5 dB	5.5 dB	15 dB	15 dB	5.5 dB	2.5 dB
50°	36°	70°	123°	170°	176°	178°
55°	33°	65°	118°	169°	175°	178°
60°	30°	61°	113°	168°	175°	178°
65°	28°	56°	109°	166°	175°	177°
70°	25°	53°	104°	165°	175°	177°
75°	24°	50°	100°	165°	174°	177°
80°	23°	46°	96°	164°	174°	177°
85°	21°	44°	92°	162°	173°	176°
90°	20°	41°	89°	161°	173°	176°
95°	18°	40°	85°	160°	172°	176°
100°	17°	37°	82°	158°	172°	176°
105°	16°	35°	79°	157°	171°	176°
110°	15°	33°	76°	156°	171°	175°
115°	15°	32°	74°	155°	170°	175°
120°	14°	30°	70°	153°	170°	175°
125°	14°	29°	68°	152°	169°	175°
130°	13°	27°	65°	151°	168°	175°
135°	12°	26°	63°	150°	168°	174°

Tabela 3

Podaci iz tabele 3 se mogu iskoristiti za formiranje kružnih dijagrama koji ukazuju na potrebne uglove incidencije zvučnih izvora neophodnih za generisanje karakterističnih intenzitetnih razlika (2.5 dB, 5.5 dB i 15 dB), pri čemu se koincidentni par posmatra kao zaseban stereo mikrofona smešten u centar kruga. Ovi crteži (slika 23) prikazuju šest zona sa obe strane stereo mikrofona, koje proizvode odgovarajuće intenzitetne razlike. Sivi sektori kruga predstavljaju zone nalaženja realnog zvučnog izvora čiji će se virtuelni par prilikom reprodukcije nalaziti pod uglom od 30° u odnosu na slušaoca. Dijagrami ukazuju i na to da par koincidentnih kardioidnih mikrofona sa postavnim uglom od npr. $A = 80^\circ$ rekonstruiše veći deo originalne zvučne scene između zvučnika, nego isti par sa postavnim uglom od npr. 110°. Zanimljivo je primetiti da se povećavanjem postavnog ugla smanjuje frontalni ugao originalne zvučne scene koja se reprodukuje od -30° do $+30^\circ$, ali da se istovremeno povećava opseg „hvatanja” onih zvučnih izvora koji se nalaze iza stereo para. Kao rezultat toga, koincidentni par sa većim postavnim uglom će ubaciti više ambijenta, publike i same

akustičke atmosfere prostora u kojem je vršeno snimanje u prostor između zvučnika, nego na mesto samih zvučnika, dok će se istovremeno scenski zvuk pomeriti više ka krajevima zvučne baze, ostavljajući nešto više prostora oko njene sredine.



Slika 23: Kružni dijagrami kardiodnog koincidentnog stereo para

Bidirekcionni par

Primenom identičnog postupka kao kod koincidentnog para mikrofona sa kardiodnim karakteristikama možemo, uz uvažavanje razlike u polaznim jednačinama koje opisuju karakteristike usmerenosti, doći do izraza za razliku intenziteta u levom i desnom kanalu koji nastaju pri upotrebi incidentnog para mikrofona sa bidirekcionnim karakteristikama. Izražena u decibelima, ta razlika iznosi:

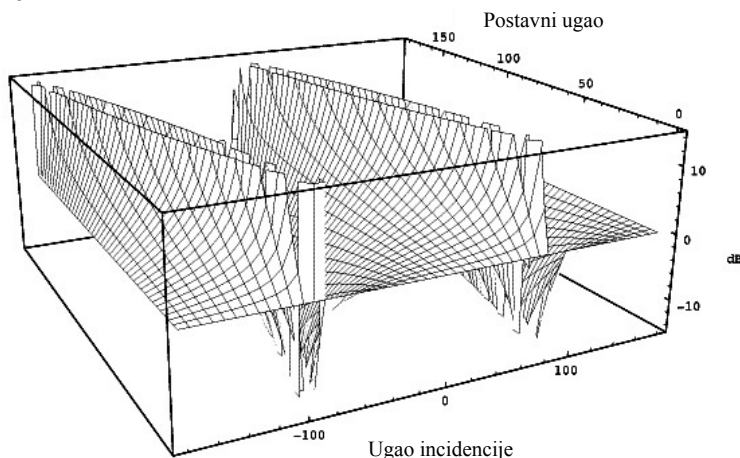
$$D[dB] = 20 \log \left| \frac{\cos\left(\frac{A}{2} - a\right)}{\cos\left(\frac{A}{2} + a\right)} \right| \quad (14)$$

Uočimo da je u proračun ove postavke neophodno uvrstiti apsolutnu vrednost odnosa intenziteta. To je direktna posledica postojanja „negativne” zadnje poluoblasti u polarnoj karakteristici direktivnosti bidirekcionnih mikrofona. Kada koristimo par koincidentnih

bidirekcionih ili hiperkardiodnih mikrofona, postoje uglovi incidencije zvučnog izvora koji dovode do toga da izlazne e.m.s. jednog i drugog mikrofona imaju različit polaritet. Ukoliko ne bismo koristili apsolutnu vrednost, došli bi u situaciju da ne možemo izračunati odnos intenziteta u decibelima, s obzirom da logaritmovanje negativnih vrednosti nema smisla. Dakle, rezultat ove jednačine nam pokazuje samo intenzitetnu razliku levog i desnog kanala, ne vodeći računa o njihovom relativnom faznom odnosu. Ovaj zaključak se svakako mora uzeti u obzir za sve kasnije analize odziva ovakvog para mikrofona.

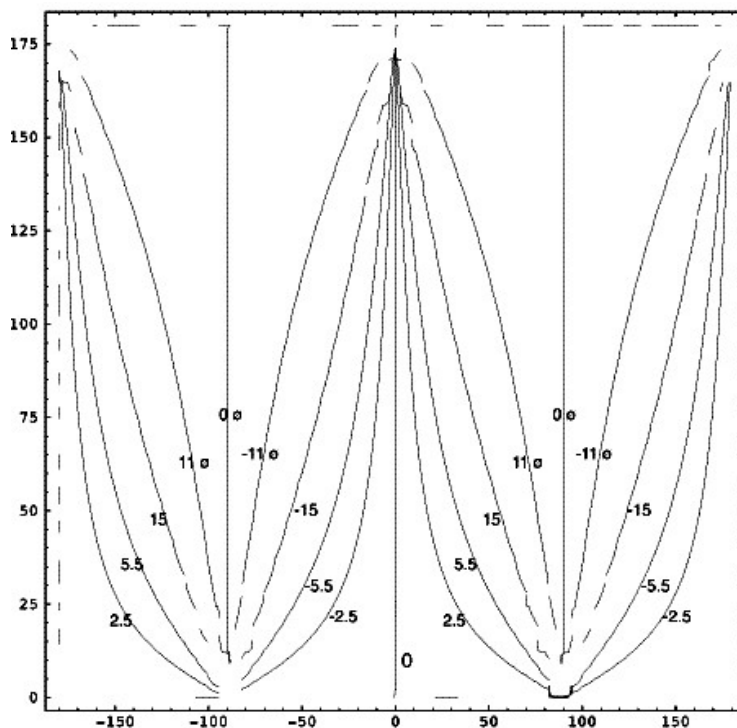
Primenom navedene jednačine na sve postavne uglove između 0° i 180° , možemo formirati trodimenzionalni grafik, prikazan na slici 24. Kao i ranije, pozitivni rezultati na vertikalnoj osi ukazuju na oblasti u kojima je desni kanal po intenzitetu jači od levog. Na istoj slici možemo primetiti da zvučni izvori koji se nalaze od 0° do 90° ispred stereo para, rezultuju jačim desnim kanalom. Međutim, izvori postavljeni od 90° do 180° proizvode jači intenzitet e.m.s. u levom kanalu. Na taj način se zvučni izvori smešteni „pozadi desno” u odnosu na mikrofone pojavljuju na levoj strani zvučne baze.

Svako ko je imao priliku da, namerno ili slučajno, obrne polaritet jednog od kanala stereo sistema, mogao je da primeti da u takvoj situaciji dolazi do pojave veoma nestabilne zvučne slike. Visoki opseg frekvencija ima tendenciju da biva lociran u prostor između zvučnika, zvuci srednjih frekvencija se često pojavljuju i van granica zvučne baze (u ekstremnim slučajevima se javljaju čak i iza ili u glavi slušaoca), dok niži opseg frekvencija biva znatno potisnut, pa čak i izostavljen iz zvučne slike. Dakle, zvučna slika gubi svoju definisanost i postaje vrlo razlivena, bez mogućnosti za preciznu lokalizaciju VZI. Ovi efekti do punog izražaja dolaze samo kada se oba kanala reprodukuju približno istim intenzitetima. Pri većim razlikama u intenzitetima levog i desnog kanala, dolazi do lociranja zvuka pod uglom od 30° , u jačem od dva zvučnika.



Slika 24: Trodimenzionalni prikaz amplitudskih razlika bidirekcionih X i Y mikrofona u koincidentnom paru u funkciji incidentnog ugla zvučnog izvora, za sve vrednosti postavnih uglova od 0° do 180°

Prilikom stereo reprodukcije muzičkog zapisa koji pokriva pun opseg frekvencija, a u slučaju suprotne polarizacije kanala, minimalna međukanalna razlika intenziteta pri kojoj dolazi do „sabijanja” zvučne slike u jači zvučnik iznosi otprilike 11 dB. Bilo koja manja razlika intenziteta u principu dovodi do malopre opisanih nestabilnosti u zvučnoj slici. Dakle, ova vrednost (11 dB) se, pri reprodukciji suprotno polarisanih kanala, može usvojiti za prag nakon kojeg se VZI locira u jednom od zvučnika, slično pragu od 15 dB međukanalne intenzitetne razlike koja važi za fazno korelisane stereo signale. To je razlog zbog kojeg konturna karakteristika para bidirekcionih mikrofona sadrži dve dodatne krive, koje ukazuju na pozicije zvučnog izvora pri kojima se javljaju razlike u intenzitetima od ± 11 dB između kanala, u slučaju kada su oni suprotno polarisani. (Ovaj prag ćemo obeležavati kao 11 dBo, da bismo znali da se odnosi na slučaj kada su kanali suprotno polarisani). Svi zvučni izvori locirani između uglova pod kojima se generišu razlike od 15 dB i 11 dBo će se pojaviti u zvučnoj slici prilikom reprodukcije pod uglom od 30° , u jačem od dva zvučnika. Izvori koji su pozicionirani između uglova koji „proizvode” razlike od +11 dBo i -11 dBo biće veoma nestabilni prilikom reprodukcije. Ova nestabilnost će, kao što smo već objasnili, biti maksimalno izražena za one izvore koji generišu obrnute faze, ali jednake intenzitete u svakom od kanala. Ove tačke su označene kao 0dBo, a fizički se nalaze pod uglovima od 90° , tj. 270° (-90°), u odnosu na osu koincidentnog para mikrofona.



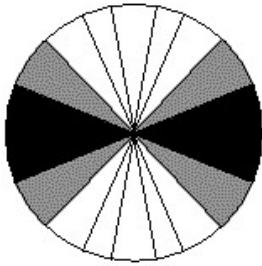
Slika 25: Konturni crtež koincidentnog para bidirekcionih mikrofona koji pokazuje karakteristične vrednosti međukanalnih intenzitetnih razlika, u zavisnosti od postavnog i incidentnog ugla

Slično kao i kod kardiodnog para, povećavanje postavnog ugla i u ovom slučaju dovodi do sužavanja rasporeda frontalnih zvučnih izvora u stereo bazi. Međutim, kod koincidentnog para bidirekcionih mikrofona ta tendencija postoji i za područja koja se nalaze „iza” mikrofona. Tako se na kružnim dijagramima (slika 26) razlikuju sivi delovi, koji ukazuju na prostor u kojem se nalaze izvori koji se u zvučnoj slici javljaju na krajevima baze, i crni delovi, koji obeležavaju zone nalaženja zvučnih izvora koji dovode do suprotnog polarisanja levog i desnog kanala, tj. do nestabilne zvučne slike (granice od -11 dBo do $+11$ dBo).

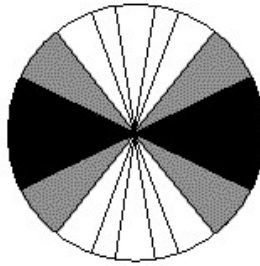
Na potpuno analogan način kao i u prethodnom slučaju, i ovde je moguće formirati tabelu koja ukazuje na uglove pod kojim bi trebalo da se nalaze zvučni izvori u odnosu na osu koincidentnog para bidirekcionih mikrofona, da bi se njima odgovarajući VZI smestili pod nekim od karakterističnih uglova u odnosu na slušaoca prilikom reprodukcije. U ovoj tabeli se takođe nalaze i vrednosti uglova za koje dolazi do smeštanja VZI u krajnje levi ili krajnje desni ugao zvučne baze, u slučaju različite polarizacije levog i desnog kanala. (granice $+11$ dBo i -11 dBo) Vrednosti postavnog ugla su varirane u granicama od 50 do 135 stepeni.

Položaj VZI	10°	20°	30°	-30°	-20°	-10°	30°	-30°
Postavni ugao	2.5 dB	5.5 dB	15 dB	15 dB	5.5 dB	2.5 dB	11 dBo	-11 dBo
50°	17°	33°	56°	124°	147°	163°	75°	105°
55°	15°	30°	53°	127°	150°	165°	74°	106°
60°	13°	27°	50°	130°	153°	167°	72°	108°
65°	13°	26°	47°	133°	154°	167°	70°	110°
70°	11°	24°	44°	136°	156°	169°	68°	112°
75°	10°	22°	42°	138°	158°	170°	67°	113°
80°	10°	20°	39°	141°	160°	170°	65°	115°
85°	9°	19°	37°	143°	161°	171°	63°	117°
90°	8°	17°	34°	146°	163°	172°	60°	120°
95°	7°	15°	32°	148°	165°	173°	58°	122°
100°	6°	14°	30°	150°	166°	174°	56°	124°
105°	5°	13°	27°	153°	167°	175°	54°	126°
110°	5°	12°	26°	154°	168°	175°	51°	129°
115°	5°	11°	24°	156°	169°	175°	49°	131°
120°	4°	10°	21°	159°	170°	176°	46°	134°
125°	4°	9°	20°	160°	171°	176°	43°	137°
130°	3°	8°	18°	162°	172°	177°	40°	140°
135°	3°	7°	15°	165°	173°	177°	37°	143°

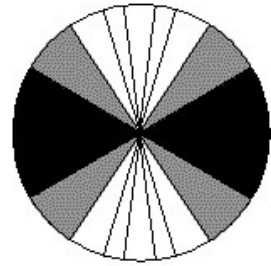
Tabela 4



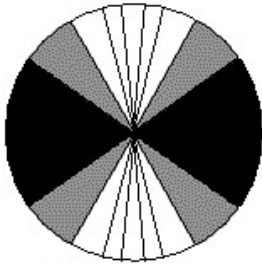
70° Postavni ugao



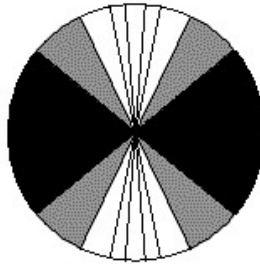
80° Postavni ugao



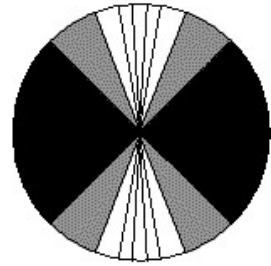
90° Postavni ugao



100° Postavni ugao



110° Postavni ugao



120° Postavni ugao

Slika 26: Kružni dijagrami za koincidentni par bidirekcionih mikrofona za 6 vrednosti postavnih uglova. Zvučni izvori koji se nalaze u sivim zonama će prilikom reprodukcije biti „smešteni” u jedan od zvučnika, dok će oni u crnoj zoni biti veoma nestabilni usled različite polarizacije X i Y signala

Hiperkardioidni par

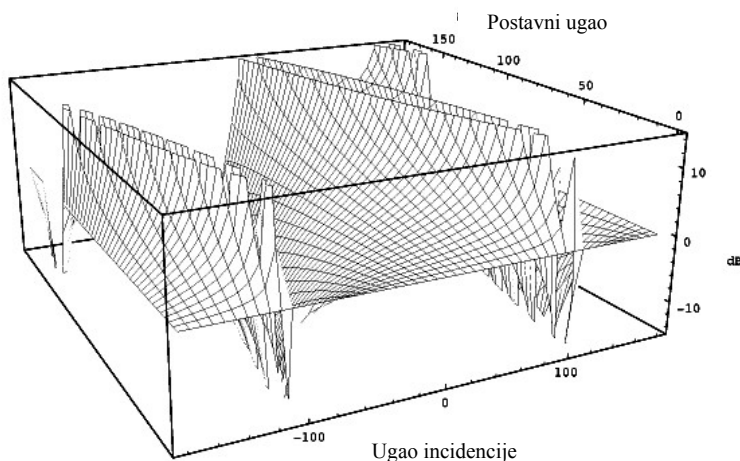
Slično kao i u prethodna dva slučaja, razmatranje ovakvog koincidentnog para mikrofona poćemo od jednaćine koja opisuje međukanalne intenzitetne razlike. U ovom slučaju ta relacija glasi:

$$D[dB] = 20 \log \frac{0.25 + 0.75 \cos\left(\frac{A}{2} - a\right)}{0.25 + 0.75 \cos\left(\frac{A}{2} + a\right)} \quad (15)$$

Odgovarajući grafovi koji proistiću iz ove jednaćine, a koji se formiraju na već opisanim principima, su prikazani na slikama 27, 28 i 29.

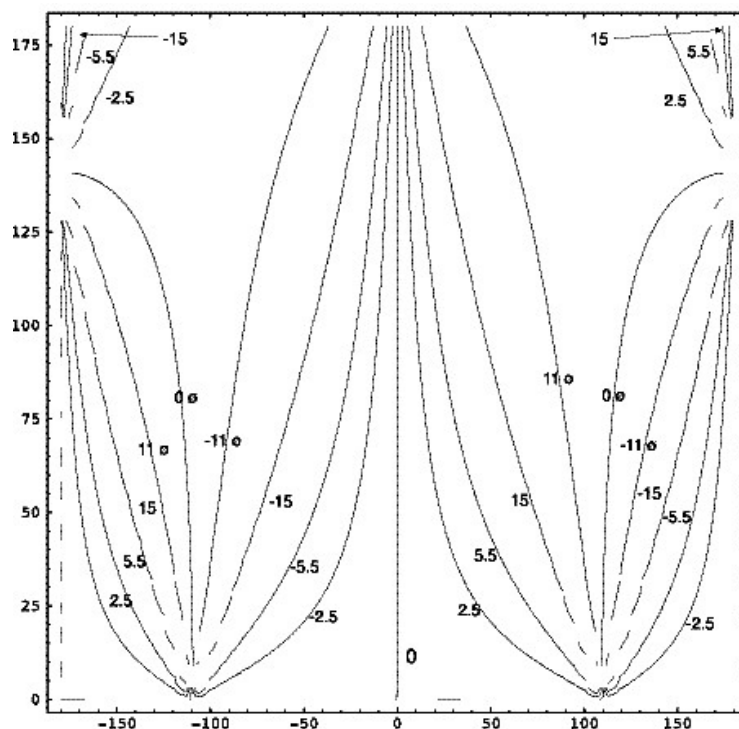
Uočimo dve zanimljive karakteristike specifićne za ovaj stereo par. Kao prvo, može se uočiti da za postavne uglove većee od 140° ne postoji mogućnost da zvućni izvor prouzrokuje

signale jednakih inteziteta u levom i desnom kanalu, a da pri tome oni budu suprotnih faznih stavova (linija 0 dBo na sl. 28). Ovo nije bio slučaj kod bidirekcionog para mikrofona, gde je mogućnost da dođe do ove situacije postojala za sve vrednosti postavnih uglova, osim 0° . Napomenimo da postavni ugao od 180° kod para bidirekcionih mikrofona uvek dovodi do ove situacije – signali u levom i desnom kanalu istih intenziteta, ali suprotnih polariteta.

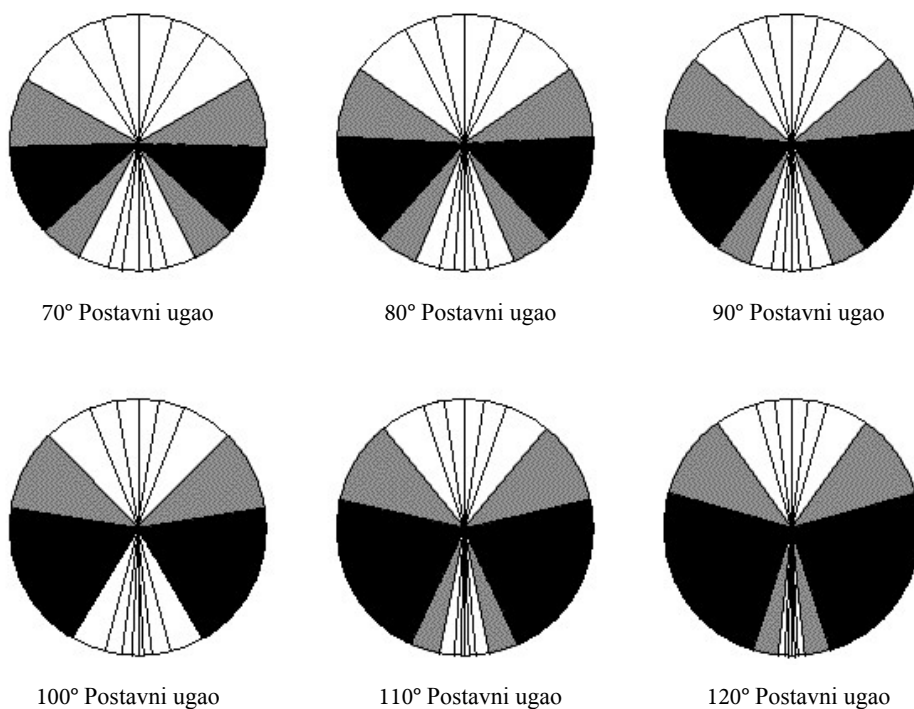


Slika 27: Trodimenzionalni grafik međukanalne intezitetne razlike X-Y para hiperkardioidnih mikrofona, u zavisnosti od incidentnog i postavnog ugla

Kao drugu zanimljivu osobinu, trebalo bi istaći da postavni uglovi manji od približno 145° rezultiraju formiranjem zvučne baze slično kao u slučaju bidirekcionog para, što podrazumeva da se zvuci koji dolaze sa prednje desne strane pojavljuju u desnoj polovini baze, dok se zvuci koji dolaze sa zadnje desne strane javljaju u levoj polovini baze, zahvaljujući dominantnom uticaju zadnjeg „repa” polarne karakteristike direktivnosti levog mikrofona. (Naravno da potpuno simetrična priča važi i za levu polovinu prostora u kojem se snima). Za postavne uglove veće od 145° ova karakteristika se menja, i postaje sličnija slučaju koji važi za par kardioidnih mikrofona, s obzirom da dominantni uticaj relativno slabog zadnjeg dela hiperkardioidne karakteristike biva prevladan prednjom stranom iste te karakteristike, koja opisuje drugi mikrofona u posmatranom stereo paru. Na slici 27 se ova osobina pojavljuje u obliku specifičnih „čoškova” na 3D konturi, dok se na slici 28 mogu zapaziti linije u gornjim čoškovima crteža.



Slika 28: Konturni prikaz karakterističnih međukanalnih intenzitetnih razlika koincidentnog para hiperkardioidnih mikrofona, u zavisnosti od postavnog i incidentnog ugla



Slika 29: Kružni dijagrami za hiperkardioidni X-Y par

Kao i u slučaju bidirekcionih mikrofona, sive zone na kružnim dijagramima označavaju prostor u kojem se nalaze zvučni izvori koji se prilikom reprodukcije smestaju u jedan od zvučnika, dok crne zone označavaju prostor u kojem se nalaze zvučni izvori koji će prilikom reprodukcije imati tendenciju ka nestabilnosti u okviru zvučne slike, usled razlike u faznim stavovima signala u levom i desnom kanalu.

Tabela koja prikazuje konkretne uglove pod kojima bi trebalo da se nalaze zvučni izvori u odnosu na stereo par da bi se njima odgovarajući VZI nalazili u karakterističnim tačkama stereo baze, data je u nastavku:

Položaj VZI	10°	20°	30°	-30°	-20°	-10°	30°	-30°
Postavni ugao	2.5 dB	5.5 dB	15 dB	15 dB	5.5 dB	2.5 dB	11 dBo	-11 dBo
50°	23°	45°	74°	142°	158°	169°	96°	125°
55°	21°	41°	70°	144°	160°	170°	95°	127°
60°	19°	38°	67°	147°	163°	171°	94°	128°
65°	18°	35°	64°	150°	164°	172°	92°	131°
70°	16°	33°	61°	152°	166°	173°	91°	133°
75°	15°	31°	58°	154°	167°	174°	89°	135°
80°	14°	28°	56°	157°	168°	175°	88°	138°
85°	13°	26°	53°	159°	170°	175°	86°	140°
90°	12°	25°	50°	161°	171°	176°	85°	144°
95°	11°	24°	48°	163°	172°	176°	84°	146°
100°	10°	22°	45°	165°	173°	177°	82°	149°
105°	10°	20°	43°	167°	174°	177°	80°	152°
110°	9°	19°	40°	169°	175°	178°	78°	155°
115°	8°	18°	38°	172°	176°	178°	76°	158°
120°	8°	16°	36°	174°	177°	178°	75°	162°
125°	7°	15°	34°	175°	178°	179°	73°	166°
130°	6°	14°	32°	XXX	XXX	XXX	70°	168°
135°	6°	13°	30°	XXX	XXX	XXX	68°	XXX

Tabela 5

2.3.2 Praktični aspekti korišćenja X - Y tehnike

Svi prethodno izneti rezultati su proračunati na osnovu idealnih modela svake od pomenutih vrsta mikrofona, kao i idealnih uslova koji bi trebali da vladaju prilikom snimanja i reprodukcije. Naravno da je u praksi situacija nešto drugačija, pa ćemo stoga na ovom mestu razmotriti neke od realnih problema koji mogu uticati na izneta razmatranja.

Ozbiljnija analiza, koja bi se odnosila na konkretan par mikrofona, bi svakako morala da uzme u obzir realnu osetljivost korišćenih membrana, za razliku od do sada razmatranog matematičkog modela. Iako većina kvalitetnijih mikrofona ima polarnu karakteristiku osetljivosti koja je bliska odgovarajućem teoretskom modelu, nijedna od njih nije savršena. Čak i mala odstupanja od matematičkog modela rezultuju promenama u generalnoj karakteristici konkretnog para, koje dovode i do promena u formiranju zvučne slike. Pa ipak, kod visoko kvalitetnih mikrofona ovi problemi su mahom uspešno prevaziđeni, tako da rezultuju relativno malim odstupanjima u odnosu na idealno proračunate rezultate.

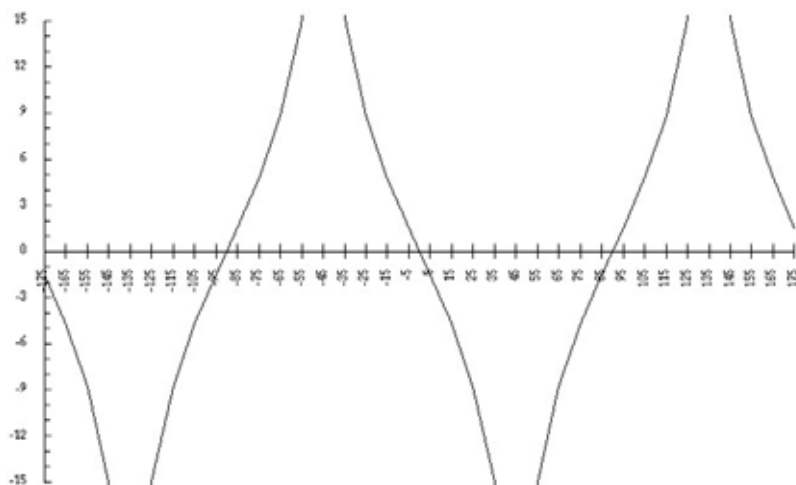
Druga, mnogo bitnija realna osobina korišćenih mikrofona, koja dovodi do znatnijih odstupanja od teoretskih razmatranja, jeste pitanje frekvencijske zavisnosti odziva konkretnog mikrofona, kao i odziva na izvore koji se nalaze izvan njegove centralne ose. Polarne karakteristike koje su korišćene u prethodnim razmatranjima su proračunavane na nominalnoj frekvenciji od 1000Hz. Ova karakteristika je, uglavnom, vrlo frekvencijski zavisna, sa generalnim trendom povećavanja usmerenosti sa povećanjem frekvencije.

Poređenjem eksperimentalno dobijenih vrednosti mikrofonskih osetljivosti sa teorijskim očekivanjima, mogu se uočiti znatna odstupanja, koja direktno zavise od frekvencije na kojoj je izvršeno merenje. Kao rezultat ove osobine direktivnih mikrofona, dolazi do „razmazivanja” VZI duž stereo baze, jer originalni zvučni izvor, koji se nalazi pod određenim uglom u odnosu na stereo par, proizvodi različite međukanalne intenzitetne razlike, u zavisnosti od toga koja je frekvencija u pitanju.

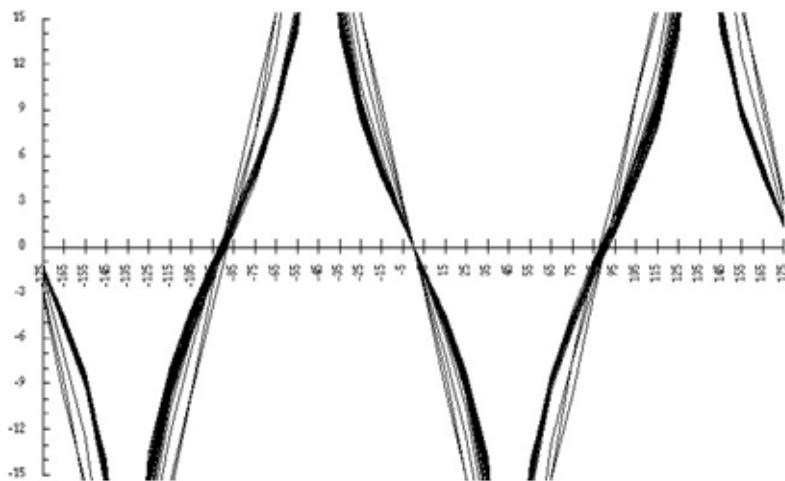
Kao ilustraciju, možemo pogledati grafike na slikama 30 i 31. Slika 30 prikazuje teorijski proračunat odziv para bidirekcionih mikrofona, koji zauzimaju postavni ugao od 90°, dok sledeći grafik predstavlja odziv istog para, ali sa uračunatim empirijskim podacima iz tabele za Senheiser MKH30 RF kondenzatorski mikrofona, s tim što je proračun rađen za svaku trećinu oktave, u rasponu od 98 Hz do 20.02 KHz.

Treća stvar koja svakako podleže diskusiji su i same vrednosti intenzitetnih razlika između levog i desnog kanala prilikom reprodukcije, na osnovu kojih su izvlačeni dalji

zaključci. Različiti slušaoci pod različitim uslovima u kojima se obavlja test slušanja uopšte ne moraju da izraze mišljenje koje bi se poklapalo sa onim da se VZI u stereo bazi nalaze pod uglovima od 10° , 20° ili 30° , ukoliko su razlike intenziteta između levog i desnog kanala 2.5, 5.5, odnosno 15 decibela. Ono što bi ipak mogli da usvojimo kao važeće, jeste činjenica da svaki slušalac zadržava stalnost svog suda. Drugim rečima, razlika od 5.5 dB može da proizvodi utisak i da se VZI nalazi pod uglom različitim od 20° , ali će ta nova pozicija biti stalna, dokle god intenzitetnu razliku održavamo konstantnom. U sličnom kontekstu možemo napomenuti i da sami uslovi slušanja, koji se pre svega odnose na akustički ambijent, dovode do nepredvidljivih pomeranja lokacije VZI u okviru zvučne slike, što dodatno utiče na promenljivost kojoj podležu izneti rezultati.



Slika 30: Računski proračunat odziv X-Y para bidirekcionih mikrofona sa postavnim uglom od 90°



Slika 31: Odziv X-Y para Sennheiser MKH30 mikrofona sa postavnim uglom od 90° , meren po trećinama oktave u opsegu od 98Hz do 20.02KHz

Na kraju bi svakako morali da uzmemo u obzir i akustičke uslove na samom mestu snimanja. Tako na primer, prve refleksije koje stižu do mikrofona mogu biti dovoljno jake da unesu neočekivane i dodatne intenzitetne razlike u oba kanala. Takođe je vrlo dobro poznato da ta vrsta refleksija može izazvati „comb – filter” efekat, koji direktno zavisi od vremenskog kašnjenja reflektovanog zvuka. Ukoliko ovakve refleksije dolaze iz pravca centralne ose direktivnog mikrofona, a direktan zvuk van nje, i ukoliko je mikrofonski okružen reflektujućim površinama, pri čemu putne razlike direktnog i reflektovanog zvuka nisu prevelike, možemo očekivati zaista drastične promene u zvuku, pre svega u njegovom frekventnom sadržaju, usled veoma jakog „comb” filtriranja. Zastupljenost ove pojave ne zavisi samo od koeficijenta apsorpcije reflektujućih površina i razdaljine na kojoj se one nalaze, već i od karakteristika usmerenosti korišćenih mikrofona.

Ukoliko uzmemo u obzir i dodatnu činjenicu da će se korišćeni par ponašati, u smislu osetljivosti, drugačije prema direktnom nego prema reflektovanom zvuku (zbog različitih pravaca iz kojih dolaze), možemo kao posledicu toga očekivati dodatne nestabilnosti u zvučnoj slici, mada ovaj problem do izražaja dolazi pre svega u specifičnim, ne toliko čestim situacijama.

2.3.3 M - S postvka

Izraz „M-S” (skraćenica od engleskog „Middle-Side”) se odnosi na tehniku postavlke mikrofona koja, slično kao kod X-Y postavke, podrazumeva postojanje koincidentnog stereo para. Jedan mikrofonski je tzv. „Mid” (M) mikrofonski (mikrofon zadužen za „sredinu” zvučne scene), koji može biti bilo koje karakteristike direktivnosti, i čija je centralna osa usmerena direktno ka sredini zvučne scene. (Ova osa ujedno predstavlja i središnju osu stereo para kao celine). Drugi mikrofonski je tzv. „Side” (S) mikrofonski, koji prevashodno pokriva bočne delove zvučne scene, i koji ima bidirekcionu ($S = \cos\theta$) polarnu karakteristiku usmerenosti, i koji je orijentisan upravno na centralnu osu M mikrofona. Rezultujuća zvučna slika se može kontrolisati izborom podesne karakteristike usmerenosti M mikrofona, ali i regulisanjem relativnog odnosa izlaznih signala iz M, tj. S mikrofona. Da bi smo ove izlazne signale mogli da reprodukujemo u klasičnom stereo sistemu, dakle putem levog i desnog zvučnika, moramo izvršiti njihovu konverziju u „klasične” X i Y signale, odnosno signale levog i desnog kanala. To se postiže odgovarajućim elektronskim sklopom za sabiranje i oduzimanje, pri čemu se signal levog kanala formira kao suma ($L = M+S$), a desnog kao razlika ($D = M-S$) M i S signala.

Da bi mogli da vršimo analizu rada MS stereo para, potrebno je da koristimo jednačine (16), koje opisuju svaki od M-S parova preko odnosa M i S signala i polarne karakteristike M mikrofona. Izlaz S mikrofona je ovde predstavljen sinusnom funkcijom, umesto češće korišćenom kosinusnom, jer je centralna osa S mikrofona orijentisana pod uglom od 90° u odnosu na centralnu osu M-S para kao celine, koja predstavlja osu od 0° ($\cos(\theta + 90^\circ) = \sin\theta$).

Uopšteni oblik tih jednačina je:

$$\begin{aligned} M &= |C (B + (1-B) \cos \theta)|, \quad 2\pi \geq \theta \geq 0 \\ S &= |(1-C) \sin \theta|, \quad 2\pi \geq \theta \geq 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Ovde C predstavlja doprinos M mikrofona ukupnom M-S signalu, dok B opisuje njegovu karakteristiku usmerenosti, i to kao odnos omnidirekcione ($S = 1$), tj. skalarne, i bidirekcione ($S = \cos \theta$), tj. vektorske komponente koju ta karakteristika sadrži. C i B su pozitivni brojevi koji se kreću u rasponu od 0 do +1. Kada je $C = 0$, izlaz iz M mikrofona praktično nema uticaja na ukupno formirani signal. Kada je $B = 0$, polarna karakteristika M mikrofona je bidirekciona, a kada je $B = 1$, karakteristika je omnidirekciona. U slučaju kada je $B = 0.5$, polarna karakteristika M mikrofona je kardiodna. Bitno je primetiti da su ovde, za potrebe iscrtavanja grafika, korišćene samo pozitivne vrednosti izraza koji opisuju M i S

signale (iz tog razloga je korišćena apsolutna vrednost u izrazima (16)), dok u realnosti ove vrednosti mogu biti i negativne, tj. i u ovoj postavci postoje zone iz kojih zvučni izvor stvara negativno polarisane e.m.s. na izlazu iz svakog mikrofona

Na osnovu vrednosti za C i B je takođe moguće izračunati i postavni ugao ekvivalentnog X-Y para. Ta formula, bez ulaska u detalje njenog izvođenja, glasi:

$$A = 2 \arctg \left(\frac{1 - C}{C(1 - B)} \right) \quad (17)$$

Ukoliko M mikrofona ima omnidirekcionu ($B = 1$) karakteristiku usmerenosti, i ukoliko M:S odnos iznosi 50 : 50, ekvivalentni X-Y par se može predstaviti parom kardiodnih karakteristika koje su postavljene „leđa uz leđa”, odnosno pod postavnim uglom od $A=180^\circ$ ukoliko se ovaj odnos menja u korist bidirekcionu (S) komponente (npr. odnos 30 : 70), ekvivalentne karakteristike postaju hiperkardioide, čiji je ekvivalentni postavni ugao takođe 180° . U kombinaciji koja favorizuje omnidirekcionu M mikrofona ($M : S = 70 : 30$), rezultujuće X-Y karakteristike su par „leđno” orijentisanih subkardioida. Dakle, u svakom slučaju postavni ugao ekvivalentnog X-Y para iznosi 180° , samo se menjaju ekvivalentne polarne karakteristike.

Kada M mikrofona ima kardiodnu karakteristiku ($B=0.5$), M-S odnos od 50 : 50 rezultuje ekvivalentnim X-Y parom hiperkardioida sa postavnim uglom od 126.9° . Kako M komponenta raste ($M : S = 70 : 30$), postavni ugao ekvivalentnog X-Y para se sužava (81.2°), s tim što se zadnja polulopta ekvivalentne hiperkardioide osetno smanjuje, čime karakteristika praktično prelazi u kardiodu. Kada dominira S komponenta ($M : S = 30 : 70$), postavni ugao ekvivalentnog X-Y para se širi (155.8°), dok zadnje polulopte ekvivalentnih polarnih karakteristika postaju veće, što takve karakteristike praktično prevodi u bidirekcionu oblik. Dakle, u ovom slučaju se promenom M-S odnosa menjaju kako postavni ugao ekvivalentnog X-Y para, tako i njegove polarne karakteristike.

I na kraju, posmatrajmo slučaj kada je M mikrofona bidirekcionalan ($B=0$). U tom slučaju su polarne karakteristike usmerenosti ekvivalentnog X-Y para uvek bidirekcionu, bez obzira na M-S odnos. Sada pri promeni tog odnosa dolazi samo do variranja postavnog ugla takvog bidirekcionog X-Y para. U slučaju kada važi $M : S = 50 : 50$, ekvivalentni postavni ugao X-Y para će iznositi 90° - dakle isto kao kod originalnog M-S para, s tim što su centralne ose X i Y mikrofona rotirane za po 45° u odnosu na centralnu osu M-S para. Kada dominira S komponenta ($M : S = 30 : 70$), postavni ugao se povećava (133.6°), a kada preovlađuje M komponenta ($M : S = 70 : 30$), ugao se smanjuje (46.4°).

Iz svega do sada izloženog može se izvući zaključak da M-S postavka praktično predstavlja transformaciju već analizirane X-Y tehnike. Međutim, ona istovremeno i pruža određene prednosti u odnosu na ostale vrste stereo postavki mikrofona, snabdevajući sposobne snimatelje i producente moćnim oružjem u borbi za što kvalitetniju stereo sliku. Razmotrimo zato sada detaljnije o kakvim se tačno prednostima radi, uz istovremeno obraćanje pažnje na specifičnosti ove postavke koje odatle proizilaze.

Osnovne karakteristike M-S tehnike

Po samoj svojoj definiciji, ova vrsta postavke obezbeđuje kompatibilnost između stereo i mono moda reprodukcije. Naime, kada se pri prelasku na mono levi i desni kanal saberu, ostaje samo signal iz M mikrofona ($L + D = (M + S) + (M - S) = 2M$). Dakle, mono signal koji se dobija pri korišćenju ove stereo postavke je signal M mikrofona, pa se pravilnim izborom njegove polarne karakteristike i samog mesta postavke može proizvesti mono signal koji ostale stereo postavke teško mogu da obezbede. Pažljivim slušanjem M signala tokom pripreme postavke, ova mono kompatibilnost može biti dovedena do optimuma.

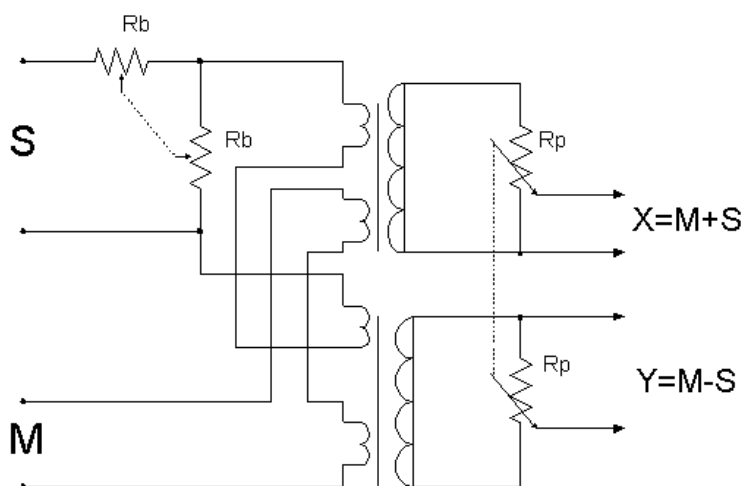
Ukoliko se osa M mikrofona usmeri direktno ka zvučnom izvoru, izbegava se nekontrolisana kolorizacija zvuka i njegovo razlivanje u zvučnoj slici, što je česta posledica promene odziva mikrofona van centralne ose. Slično tome, veliki deo ambijenta se nalazi na osi S mikrofona, tako da je i kolorizacija reverberantnog polja manje izražena. Činjenica da je M mikrofona uglavnom zadužen za sredinu zvučne scene, gde se obično nalazi i zvučni izvor, a da S mikrofona pokriva bokove, a samim tim i veći deo ambijenta, je takođe vrlo dobro došla u kontekstu mono/stereo kompatibilnosti. Prosto sabiranje signala levog i desnog kanala, koji sa sobom nose i dosta nekorelisanih informacija o prostoru, često ume da dovede do neprijatnih rezultata. U M-S tehnici sav prostor koji se nalazi u mono signalu potiče od M mikrofona, tako da je ona zaštićena od ovakvih problema. Upravo ovi navedeni primeri odlične mono/stereo kompatibilnosti su razlog iz kojeg se ova vrsta postavke puno koristi za potrebe radija, televizije i filma, gde je mono reprodukcija još uvek najrasprostranjeniji vid reprodukcije.

Sledeća prednost M-S sistema je u tome što se svaka od komponenti (M i S) može tretirati nezavisno. To omogućava selektivne korekcije signala, koje su više nego dobro došle u praksi. Uzmimo za primer neke probleme vezane za sam prostor u kojem se snima. Nije redak slučaj da se zbog loših akustičkih uslova javlja niskofrekvencijski šum (spoljna buka, strujni brumovi, ventilacija i sl.). S obzirom da S signal u principu nosi sa sobom dosta takvih

informacija, možemo njegovim propuštanjem kroz „hi-pass” filter znatno uticati na smanjenje tog problema, a da istovremeno uopšte ne menjamo sadržaj M signala. Naravno, to se mora činiti sa merom, da ne bismo narušili kvalitet celokupne zvučne slike.

Sledeća veoma praktična karakteristika ove tehnike je mogućnost regulacije stereo baze, koja se zasniva na elektronskoj kontroli odnosa M i S signala. Menjanje širine baze se vrši povećanjem i smanjenjem S signala, dok se pozicioniranje VZI u bazi izvodi povećavanjem, tj. smanjivanjem X ili Y signala (uz istovremeno smanjivanje, tj. povećavanje onog drugog). Dakle, stereo zvuk snimljen M-S parom se može proizvoljno raširiti ili suziti u okviru zvučne baze, a onda se signal tako određene širine može dodatno pozicionirati u horizontalnoj ravni. Ovakvu manipulaciju zvučne slike je u principu moguće izvršiti na mestu snimanja, pri čemu se za potrebe monitoringa M-S signal mora transformisati u odgovarajuću X-Y signal. Međutim, ukoliko se izvrši direktno snimanje M i S signala, regulacija zvučne slike se može ostaviti za fazu postprodukcije, što je pogotovo zgodno kada usnimljeni zvuk treba prilagoditi nekom određenom trenutku, poput scene u filmu ili na televiziji i tome slično. Naravno, mono/stereo kompatibilnost i u ovom slučaju ostaje potpuno predvidiva na prethodno opisani način.

Elektronski slopovi kojima je moguće regulisati širinu zvučne baze (odnosno količinu S signala) i koji istovremeno prevode M i S signale u odgovarajuće X-Y komponente se nazivaju stereo regulatori ili M-S dekoderi. Prvobitne metode za postizanje ovog cilja su podrazumevale korišćenje dva transformatora sa dualnim primarima (slika 32).

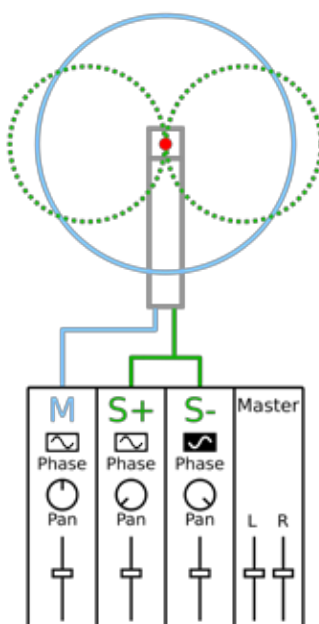


Slika 32: Principialna šema M-S regulatora u transformatorskoj tehnici

Ulazni M signal se na oba transformatora vodi na isti način, dok se S signal na gornji transformator, odakle se skida X komponenta, vodi „u fazi”, dok se na donji transformator, sa kog se skida Y komponenta, vodi sa obrnutim polaritetom. Razdelnik napona na S ulazu služi za regulisanje količine S signala koji se vodi u dalju obradu, tj. za regulisanje širine stereo baze, dok se sa otpornika R_p skidaju odgovarajući nivoi X i Y signala, za levo-desno pozicioniranje VZI. Problem sa ovakvim pristupom je u povećanju distorzije i šuma, koji nastaju kao posledica uvođenja dodatnih transformatora i otpornika na put već i onako slabog mikrofonskog signala.

U principu, najbolji rezultati se postižu kada se izlazi M i S mikrofona vode direktno u „*high quality*” mikrofonske predpojačavače, odakle se dalje signal na linijskom nivou uvodi u kolo M-S dekodera. To opet može biti dekodera u transformatorskoj tehnologiji, ali se danas mahom koriste kola sa aktivnim komponentama koja omogućavaju dobro balansirane izlazne signale i kontrolu M-S odnosa, bez velikog uticaja na odnos signal-šum, te frekvencijsku ili faznu karakteristiku.

Stereo regulatori su se sretali kao sastavni delovi određenih audio mikseta, dok se danas M-S dekodera češće prave kao posebni uređaji sa nezavisnim napajanjem, koji rade sa signalima linijskog nivoa, i kod kojih se kotrola M-S odnosa vrši jednim potenciometrom.



Slika 33 : Principialna šema M-S regulatora u transformatorskoj tehnici

Alternativni metod tretiranja M-S signala podrazumeva korišćenje tri ulaza na mikseti (slika 33). „S” signal se deli na dva podjednaka dela (preko Y adaptera), koji se zatim vode u dva nezavisna ulaza na mikseti, pri čemu se jedan od njih šalje na levu šinu, a drugi, fazno pomeren za 180°, na desnu šinu izlaznog master modula. Signal sa M mikrofona se vodi u treći kanal, pri čemu se vrši njegovo pozicioniranje u sredinu zvučne slike. Na taj način levi kanal prima sumu M i S signala, a desni njihovu razliku. Podešavanjem relativnih odnosa signala u sva tri kanala, moguće je kontrolisati izgled zvučne slike. Osnovni problem ovog rešenja leži u činjenici da S mikrofoni „napaja” dva ulaza na mikseti, te samim tim i „vidi” duplo manju ulaznu impedansu, što može dovesti do povećanja šuma i/ili distorzije, tj. degradacije ukupnog signala. Konkretni nivo ove pojave zavisi od kvaliteta korišćenih mikrofona i mikrofonskih predpojačavača. Ne bi trebalo zanemariti ni činjenicu da je ovo dosta „nekomforan” način rada, pogotovo u uslovima živih prenosa i snimanja, kada je neophodno donošenje trenutnih odluka i promena M : S odnosa.

Praktični aspekti korišćenja M-S tehnike

Upotreba M-S tehnike ni u kom slučaju neće dovesti do željenih rezultata ukoliko se ne obrati velika pažnja samom činu postavljanja mikrofona. S obzirom da pravilno angularno pokrivanje široke zvučne scene često zahteva da se M-S par nalazi na relativno velikom rastojanju od nje, akustičke osobine prostora u kojem se snimanje obavlja dolaze do velikog izražaja, pa se posebna pažnja mora posvetiti pravilnom balansiranju direktnih i reflektovanih komponenti zvuka. Dodatno vreme i trud koji se utroše na traženje pravog mesta za postavku M-S para kao po pravilu predstavljaju vrlo isplativu investiciju.

Bilo bi veoma pogrešno zaključiti da upotreba ove tehnike sama po sebi dovodi do optimalne kompatibilnosti između mono i stereo reprodukcije. U tom kontekstu se posebna pažnja mora posvetiti izboru M mikrofona, koji će najbolje odgovarati zadatim uslovima snimanja. Sama karakteristika direktivnosti ponekad može biti isuviše usmerena, čime se pokriva „preuzak” prostor za potrebe mono reprodukcije, pri čemu stereo zvučna slika i dalje može odlično zvučati zahvaljujući doprinosu S mikrofona. S druge strane, M mikrofoni mogu biti i „preširoki”, što može dovesti do neželjene pojave suviše velikog učešća reverberacionog zvuka u mono signalu. Dakle, da bi se postigla željena kompatibilnost, bez obzira što koristimo M-S tehniku, i dalje moramo pažljivo kontrolisati kako stereo, tako i sam mono signal.

S obzirom da se u većini slučajeva centralna osa M mikrofona usmerava ka sredini zvučne scene, najbolji frekventni odziv se postiže upravo iz tog pravca. To je još jedan razlog iz kojeg M-S tehnika nudi bolju mono kompatibilnost od ekvivalentne X-Y strukture. M

mikrofon se nalazi direktno usmeren ka zvučnom izvoru, dok kod mikrofona koji formiraju X-Y par to nije slučaj, što dovodi do kolorizacije i nestabilnosti centralne zone zvučne slike. Direktivni mikrofoni kao po pravilu najbolji frekventni odziv imaju u odnosu na zvučne izvore koji im se nalaze na centralnoj osi, i koji su dovoljno daleko da bi se izbeglo izdizanje niskih frekvencija usled efekta blizine. Kada se mikrofon pomeri za neki ugao, tako da zvuk dolazi van ose, odziv na visokim frekvencijama progresivno opada sa povećavanjem tog ugla. U tom frekventnom opsegu do izražaja dolaze i sam oblik i veličina kućišta mikrofona, usled pojave difrakcije. Iz tih razloga, uvek pri praktičnoj upotrebi treba biti svestan oblika frekventne zavisnosti polarnih karakteristika korišćenih mikrofona.

Analizirajmo situaciju koja nastaje pri upotrebi dve vrlo rasprostranjene X-Y postavke, kao što su hiperkardiodni par sa postavnim uglom od 90° i kardiodni par sa postavnim uglom od 110° . U prvom slučaju se zvučni izvor, koji se nalazi na sredini zvučne scene, nalazi 45° od ose, a u drugom na 55° od centralne ose svakog od mikrofona. S obzirom da su pod tim uglovima mikrofoni znatni osetljiviji na niže frekvencije, vrlo se često dešava da centralni zvučni izvor biva snimljen sa viškom niskofrekventnog opsega, tj. sa srazmerno manjim sadržajem visokih frekvencija, što posledično dovodi do mutnijeg zvuka prilikom reprodukcije (na visokim frekvencijama imamo rupu u sredini zvučne slike), što je posebno izraženo pri sabiranju levog i desnog kanala, tj. u mono reprodukciji.

S obzirom da M-S tehnika nudi najbolji frekventni opseg upravo na centralnoj osi, dok bokove zvučne scene vrlo lepo pokriva S mikrofon, nije redak slučaj da se ona koristi za snimanje vrlo širokih zvučnih izvora (tada se najčešće pribegava upotrebi neusmerenog M mikrofona), kao što su horovi, veliki orkestri i sl. S druge strane, pri snimanju pojedinačnog zvučnog izvora često se koristi usmereniji tip M mikrofona, pri čemu se u obzir uzima činjenica da je njegov odziv najbolji na osi u kojoj S mikrofon praktično i nema odziv. Iz tog razloga S komponenta postaje primarno nosilac reverberacione informacije, a M-S odnos se može koristiti za kontrolu odnosa direktnog i reflektovanog zvuka u konačnoj zvučnoj slici.

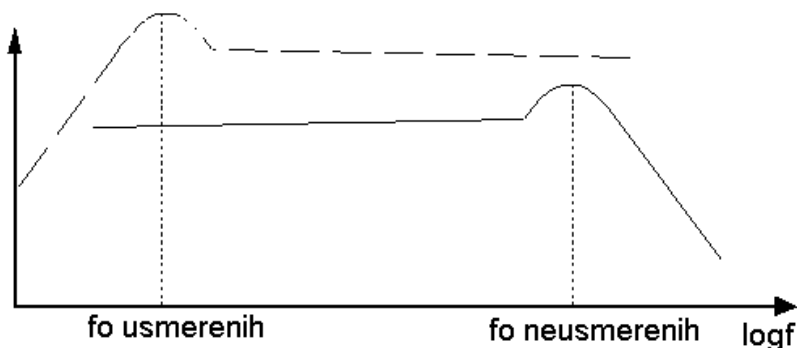
2.4 „*Spaced-apart*” tehnike

Sve do sada analizirane tehnike postavke mikrofona su podrazumevale da zvuk do obe kapisle stiže istovremeno, a da na formiranje stereo zvučne slike utiče isključivo razlika u intenzitetima izlaznih signala jednog i drugog mikrofona. Kao što je ranije istaknuto, pozicioniranje zvučnog izvora se može vršiti i na osnovu različitih vremenskih trenutaka prispeće zvuka do levog i desnog uha, tj. formiranje zvučne slike može biti ostvareno i korišćenjem različitih kašnjenja zvuka do jednog, tj. drugog mikrofona. U tu svrhu se mikrofoni postavljaju na nekom određenom međusobnom rastojanju, čime, dakle, osim razlike u intenzitetima u „igru” ulaze i vremenske razlike. Ovakve tehnike su poznate pod engleskim nazivom „*Spaced Apart*” tehnike, i sada ćemo razmotriti neke od njihovih osnovnih osobina.

Prvo što se mora istaći je da ova vrsta stereo postavke ima veoma izražene probleme sa mono kompatibilnošću. Na ma kom rastojanju bili postavljeni takvi mikrofoni, isti zvuk će do jednog i drugog dolaziti u različitim vremenskim trenucima. Pri sabiranju njihovih izlaza za potrebe kreiranja mono signala, može doći do znatnih promena u samoj boji zvuka, kao posledica pojave „*comb-filter*” efekta, koji nastaje, kao što je već objašnjeno, usled međusobnih faznih pomaka istih signala koji se sabiraju. U ekstremnim slučajevima se čak može desiti i tolika promena u zvuku da npr. snimljeni orkestar zvuči kao da se nalazi na kraju neke dugačke cevi. Sasvim se logično nameće pitanje iz kojih razloga se onda ova tehnika uopšte i koristi, kada ovakvih problema u principu nema kod koincidentnih tipova stereo postavki.

Svi koincidentni sistemi podrazumevaju korišćenje usmerenih mikrofona, kao neophodan uslov da bi se mogao ostvariti potreban nivo intenzitetne razlike u levom i desnom kanalu stereo sistema. Usmereni mikrofoni, kao što smo već objasnili, rade na principu razlike pritisaka. Iz čisto konstrukcijskih razloga, u čije detalje nećemo zalaziti, ova vrsta mikrofona ima „problema” sa odzivom na niskim frekvencijama. Naime, sa frekventne karakteristike osetljivosti gradijentnih mikrofona (isprekidano), se vidi da postoji rezonantna učestanost f_0 , ispod koje dolazi do naglog pada osetljivosti. Današnja tehnologija, doduše, omogućava spuštanje te frekvencije ispod radnog područja, ali taj proces generalno utiče na zvučni kvalitet, u smislu finoće i „veličine” odziva na najniži opseg frekvencija.

S druge strane, omnidirekcioni mikrofoni nemaju tih problema. Kvalitetni mikrofoni ovakve polarne karakteristike usmerenosti imaju vrlo fin i „širok” niskofrekventni opseg, sa istovremeno i veoma ravnomernim odzivom van centralne ose. Obe ove karakteristike su veoma poželjne u snimateljskoj praksi. Jedini nedostatak je što dva omnidirekcionalna mikrofona



Slika 34: Osetljivost gradijentnog (- -) i presionog mikrofona

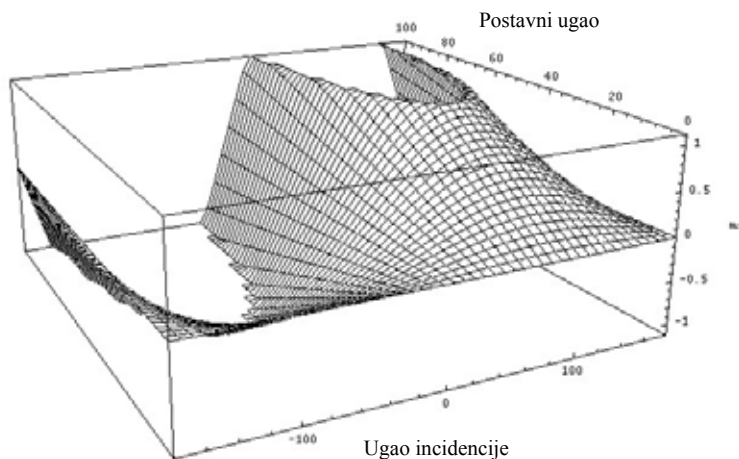
u koincidentnom paru jednostavno ne daju dobru stereo sliku, jer zbog svoje neusmerenosti ne „proizvede” dovoljno intenzitetnih razlika. Jedini način da se oni iskoriste za stereo snimanje je bio da se prostorno razdvoje.

Posmatrajmo par omnidirekcionih mikrofona na nekom međusobnom rastojanju. S obzirom da je to rastojanje veoma često manje od jednog metra, te da se zvučni izvori, pogotovo u slučaju snimanja klasične muzike, veoma često nalaze na znatno većem rastojanju, za potrebe prvih analiza možemo zanemariti postojanje intenzitetnih razlika između signala levog i desnog mikrofona. Ukoliko pogledamo tabelu (1), možemo konstatovati da u slučaju kada su intenziteti signala u oba kanala identični (0dB), kašnjenja od 0.2mS, 0.44mS i 1.12mS „smeštaju” VZI pod uglovima od 10°, 20° i 30° respektivno. Za potrebe računanja vremenskog kašnjenja zvuka sa različitih lokacija oko mikrofona, koristićemo sledeću jednačinu, koja je dobijena na osnovu pomenutih aproksimacija, na sličan način opisan prilikom izvođenja jednačine (1) (pogledati sliku 2):

$$Dt = \frac{m \cdot \sin a}{34} \quad (18)$$

U ovoj formuli Dt predstavlja međukanalni vremenski pomeraj, izražen u milisekundama, ‘m’ predstavlja rastojanje između mikrofona, izraženo u cm, dok je ‘a’ ugao incidencije zvučnog izvora.

Primenom ove relacije na sve uglove incidencije između 0 i 180 stepeni, i međusobna mikrofonska rastojanja od 0 do 100 cm, možemo formirati 3D graf prikazan na slici (35).



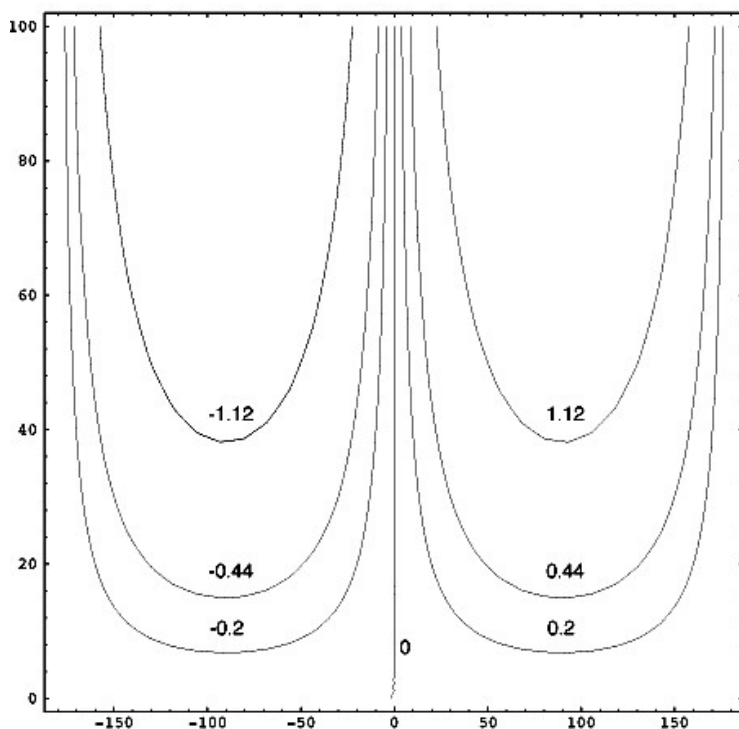
Slika 35: Trodimenzionalni prikaz vremenske razlike signala u levom i desnom kanalu u funkciji međumikrofonskog rastojanja i ugla incidencije

Ovaj graf se, na sličan način kao što je to činjeno kod koincidentnih parova, može iskoristiti za konstruisanje crteža sa slike 36, koji ukazuje na uglove incidencije pod kojima se mora nalaziti zvučni izvor da bi mogao da prouzrokuje željena međukanalna kašnjenja signala, i to za različita međumikrofonska rastojanja. Tabela 6 sadrži upravo podatke dobijene sa tog grafa, ili direktnom primenom formule (18).

Analizom tako dobijenih rezultata se može primetiti da mala rastojanja između mikrofona jednostavno nisu u stanju da „generišu” međukanalna kašnjenja potrebna za popunjavanje celokupne stereo baze, u širini od $\pm 30^\circ$. Tako na primer za rastojanje od 10cm nije moguće ostvariti ni međusobno kašnjenje od 0.44ms, koje je neophodno za postavljanje VZI pod uglom od 20° u odnosu na slušaoca. Kao što se iz tabele 6 može uočiti, tek za međumikrofonska rastojanja veća od 35cm dolazi do „popunjavanja” celog prostora u okviru zvučne baze.

Takođe je moguće primetiti da je generalni odziv ovakvog para, slično kao u slučaju koincidentnih bidirekcionih parova, simetričan po dve ose. Osnovna razlika je u tome što omnidirekcionni par zadržava isti polaritet signala, bez obzira da li se zvučni izvor nalazi ispred ili iza para. To se najbolje može uočiti poređ enjem kružnih dijagrama sa slike 26 i 37. Ovakava osobina se zgodno može iskoristiti u situacijama kada je neophodno smestiti mikrofon na sredinu zvučne scene, tj. kada je sa svih strana okružen izvođačima.

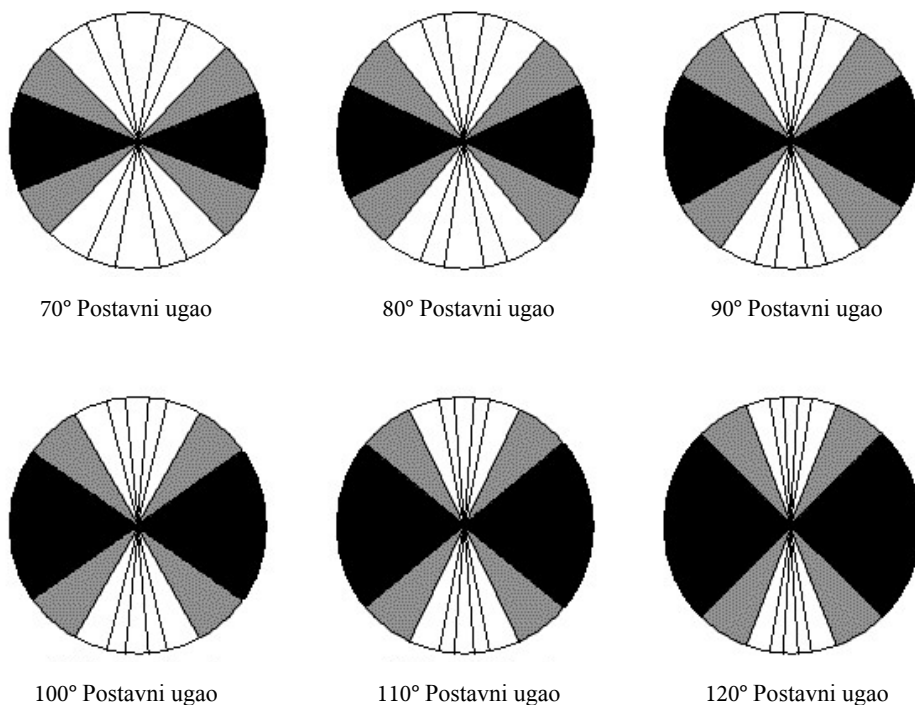
Kao što je već naglašeno, kašnjenja zvuka od prvog do drugog mikrofona, koja su reda veličine 1ms, su dovoljna da VZI prilikom reprodukcije smeste u same krajeve zvučne



Slika 36: Konturni prikaz karakterističnih vrednosti međukanalnih kašnjenja u funkciji rastojanja između mikrofona izraženog u cm (y-osa) i ugla incidencije zvučnog talasa (x-osa)

baze. Međutim, neophodno je imati na umu da kašnjenje između levog i desnog kanala od 1ms može biti posmatrano i kao fazni pomeraj signala od 360° na frekvenciji od 1000Hz, ali i kao fazni pomeraj od 180° , na frekvenciji od 500Hz. Drugim rečima, jedan zvuk koji ima spektar određene širine, i koji se reprodukuje sa fiksnim kašnjenjem između levog i desnog kanala, biva prilikom te reprodukcije različito fazno pomeren na svakoj od frekvencija iz svog spektra, što može dovesti do iznenađujućih efekata, pre svega do razlivanja konkretne strukture i položaja VZI.

Dakle, zvučna slika dobijena ovom tehnikom se ne odlikuje velikom preciznošću i vrlo često dolazi do njenog „razmazivanja” duž zvučne baze. Postoji jedno zanimljivo poređenje koje kaže da je dobar snimak nastao korišćenjem koincidentne tehnike - poput crteža: veoma precizan, sa dosta detalja i da ne ostavlja previše prostora za maštanje; s druge strane, snimak nastao upotrebom prostorno razdvojene tehnike više liči na akvarel – detalji su razliveni, a suština je pomerenjena više ka impresiji nego ka realnosti. Traženje analogija ovakve vrste je veoma opasna i nezahvalna stvar, jer može dovesti do „okoštavanja” i predrasuda vezanih za pojmove koji se opisuju na taj način. Iz tog razloga bi bilo dobro navedeno poređenje shvatiti samo uslovno.



Slika 37: Kružni dijagrami prostorno razdvojenog mikrofonskog para za različite vrednosti međumikrofonskog rastojanja. Sive zone predstavljaju oblasti nalaženja zvučnog izvora za koje se odgovarajući VZI prilikom reprodukcije javlja pod uglom od 30° u odnosu na slušaoca.

Ukažimo na još jedan potencijalni problem koji može nastati prilikom korišćenja ove postavke. Ukoliko se međumikrofonsko rastojanje isuviše povećava, postoji tendencija da se praktično svi zvučni izvori (osim onih koji se nalaze na tačno jednakom rastojanju od oba mikrofona) prilikom njihove reprodukcije pomeraju ka jednom ili drugom kraju zvučne baze, u zavisnosti od toga koji im je mikrofona bliži, što dovodi do pojave „rupe” u sredini zvučne baze. Uzrok tome je što se i intenzitetne i vremenske razlike superponiraju, tako da signal bližeg mikrofona previše dominira. Najprostiji način da se ovaj problem prevaziđe je da se mikrofoni približe jedan drugom, što međutim može negativno uticati, iz malopre objašnjenih razloga, na samu prostornost zvučne slike. Iz tog razloga se veoma često pribegava dodavanju trećeg mikrofona, čiji se izlaz ravnomerno šalje u oba kanala. Centralni deo zvučne slike koji se proizvodi na ovaj način stabilizuje celo stereo polje, pri čemu dolazi i do dodatnog fokusiranja centralnog područja zvučne scene, gde se najčešće nalaze solisti, pevači i slični „važni” zvučni izvori.

Podaci dobijeni na osnovu grafika sa slike 36, ili direktnom primenom formule (18), su predstavljeni u tabeli 6.

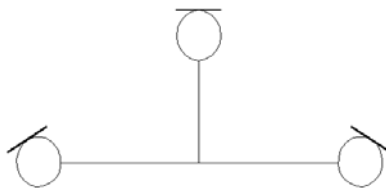
Medumikrofonsko rastojanje	10°	20°	30°	30°	20°	10°
	0.2 mS	0.44 mS	1.12 mS	1.12 mS	0.44 mS	0.2 mS
10 cm	43°	XXX	XXX	XXX	XXX	137°
15 cm	27°	86°	XXX	XXX	94°	153°
20 cm	19°	48°	XXX	XXX	132°	161°
25 cm	16°	37°	XXX	XXX	143°	164°
30 cm	13°	30°	XXX	XXX	150°	167°
35 cm	11°	25°	XXX	XXX	155°	169°
40 cm	10°	22°	72°	108°	158°	170°
45 cm	9°	19°	58°	122°	161°	171°
50 cm	8°	17°	49°	131°	163°	172°
55 cm	7°	16°	44°	136°	164°	173°
60 cm	6°	15°	40°	140°	165°	174°
65 cm	6°	13°	36°	144°	167°	174°
70 cm	6°	12°	33°	147°	168°	174°
75 cm	5°	11°	31°	149°	169°	175°
80 cm	5°	11°	28°	152°	169°	175°
85 cm	5°	10°	26°	154°	170°	175°
90 cm	5°	10°	25°	155°	170°	175°
95 cm	4°	9°	24°	156°	171°	176°
100 cm	4°	9°	22°	158°	171°	176°

Tabela 6

Razmotrimo sada nekoliko konkretnih načina za korišćenje ove vrste postavke!

2.5 „Decca-tree” postavka

Jedna od vrlo često korišćenih „*spaced-apart*” tehnika, koja podrazumeva i korišćenje trećeg mikrofona, je tzv. „*Decca-Tree*” postavka, razvijena početkom pedesetih godina u okviru kompanije „*Decca*”. Njen osnovni oblik podrazumeva da se mikrofoni nalaze u temenima ravnokrakog trougla, pri čemu se centralni mikrofona postavlja bliže zvučnom izvoru u odnosu na ostala dva (Slika 38). Dimenzije ovakvog trougla nisu previše kritične, ali, čisto za sticanje osnovne slike, možemo pomenuti rastojanje između bočnih mikrofona od oko 140cm, pri čemu se centralni mikrofona može nalaziti na oko 75cm ispred njih. Naravno da se ove dimenzije moraju prilagođavati veličini zvučne scene, prostoru, a i samim karakteristikama korišćenih mikrofona. Često se pribegava i zaokretanju bočnih mikrofona ka ivicama zvučne scene, radi dobijanja što boljeg odziva na visokim frekvencijama iz tih delova prostora.



Slika 38: Šematski prikaz „*decca-tree*” postavke

Kao što bi se moglo i pretpostaviti, izlaz levog mikrofona se vodi u levi kanal, desnog u desni, dok se izlazni signal centralnog mikrofona vodi ravnomerno u oba kanala. Iako dodavanje centralnog mikrofona, čiji se izlaz direktno sabira sa izlazima bočnih, realno može dovesti do pojave „*comb-filter*” efekta prilikom stereo reprodukcije, prevazilaženje stvaranja „*rupe*” u sredini zvučne slike i njena dodatna stabilnost, učinile su ovu tehniku veoma rasprostranjenom. Ova stabilnost je posebno naglašena isturanjem centralnog mikrofona bliže zvučnom izvoru. Na taj način zvuk do njega dolazi pre nego do bočnih mikrofona, što dovodi do toga da se zvučna slika formira od centra, šireći se ka krajevima. Ovo je veoma suptilan efekat, koga slušalac najčešće i nije svestan, ali koji ovu postavku čini vrlo „*zanimljivom*” za upotrebu.

2.6 ORTF i NOS postavke

To što je prostorno razdvojena postavka mikrofona razvijena pre svega iz potrebe za korišćenjem omnidirekcionih mikrofona, nikako ne znači da se na isti način ne mogu koristiti i direktivni tipovi mikrofona. Često se dešava da snimatelji koriste pojedine osobine i koincidentnih i „*spaced-apart*” tehnika, u cilju postizanja željenih rezultata. To je dovelo do razvoja tzv. „*near coincident*” tehnika, koje podrazumevaju korišćenje dva direktivna mikrofona na nekom, ne tako velikom, međusobnom rastojanju. Time se kombinuju intenzitetne razlike, koje su posledica direktivnosti korišćenih mikrofona, i različita vremena prispeća zvuka do svakog od njih, usled prostorne razdvojenosti. Vrlo često se na taj način mogu potisnuti neki neželjeni zvuci, poput „loše” reverberacije, zvukova iz publike i slično, koji se često pojavljuju u zvučnoj slici prilikom korišćenja omnidirekcionih mikrofona.

Kombinovanjem različitih polarnih karakteristika korišćenih mikrofona, njihovog međusobnog rastojanja i ugla pod kojima im se nalaze centralne ose, moguće je vrlo precizno kontrolisati bitne parametre stereo zvučne slike, poput njene širine, odnosa direktnog i reflektovanog zvuka, fazni odnos signala u levom i desnom kanalu, kao i efekat ugaone distorzije, tj. područje zvučne scene koji takav par pokriva, odnosno unosi u zvučnu sliku. Naravno da svaka postavka zahteva poseban pristup, ali se kao početne vrednosti u razmatranju problema pokrivenosti zvučne scene u funkciji međusobnog razmaka i postavnog ugla mikrofonskog para, mogu uzeti vrednosti iz tabele 7, koja se odnosi na kardiodidni par.

Širina zvučne scene	Razmak između mikrofona	Postavni ugao
60°	40 cm	100°
80°	30 cm	90°
100°	25 cm	70°

Tabela 7

Dve velike evropske radio–difuzione kompanije su za svoje potrebe razvile karakteristične postavke „*near coincident*” tipa, koje su se veoma dobro pokazale u praksi. ORTF (*Office de Radio Television Francaise*) tehnika podrazumeva korišćenje dva kardiodidna mikrofona na međusobnom rastojanju od oko 17cm, sa postavnim uglom od 110°, dok NOS (*Nederlandsche Omroep Stichting*) postavka predviđa upotrebu takođe kardiodidnog para, pri čemu se mikrofoni nalaze na međusobnom rastojanju od oko 30cm i pod uglom od 90°. Obe ove tehnike su dosta korišćene, jer daju dobre rezultate i direktnom primenom, pre svega u situacijama kada je vreme za postavku mikrofona limitirano, što je, u principu, dosta čest slučaj

u radio-televizijskoj praksi. Naravno da se najbolji rezultati mogu postići tek ako se navedene vrednosti shvate kao početni parametri, koje treba prilagoditi realnim uslovima snimanja.

„*Spaced-apart*” tehnike su vrlo popularne i često korišćene za snimanje klasične muzike, s obzirom da proizvode neku vrstu „toplijeg” zvuka. Zanimljivo je primetiti da se vremenska kašnjenja signala, koja postoje između mikrofona, mogu posmatrati kao vrsta „dodatnih” prvih refleksija koje se superponiraju na one „prirodne”, neraskidivo vezane za sam prostor u kojem se obavlja snimanje. Ukoliko tako gledamo na stvari, možemo zaključiti da snimatelj može samom postavkom i izborom vrste mikrofona da utiče na ova kašnjenja i na taj način poboljšava kvalitet snimka. Zato i nije retkost da se ovoj tehnici pribegava u neidealnim akustičkim uslovima, sa nastojanjem da se oni eventualno poboljšaju.

2.7 Kombinovane tehnike

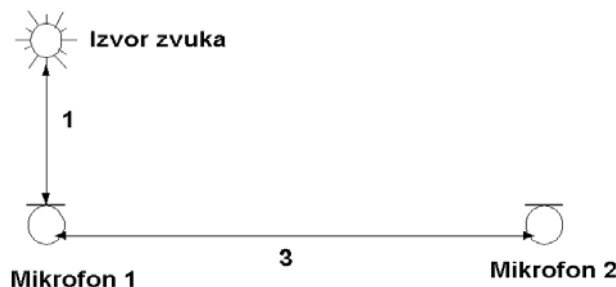
Prisustvovanje izvođenju nekog muzičkog dela predstavlja specifičan doživljaj, koji podrazumeva veoma suptilan spoj kako same muzike i načina na koji se ona interpretira, tako i sveukupne atmosfere i energije koja se formira i razmenjuje između izvođača i publike na licu mesta. Većiti „san” svih pravih snimatelja i producenata je da takav jedan osećaj što vernije zabeleže i pokušaju da eventualnog slušaoca „prenesu” na originalno mesto na kojem je delo izvedeno. Najmoćnije oruđe kojim raspolažu za potrebe postizanja takvog cilja svakako predstavlja jedan dobar stereo mikrofonski par, koji bi trebalo da predstavlja „uši” slušaoca koji iz ovih ili onih razloga nije bio u stanju da prisustvuje originalnom izvođenju, pa je prinuđen da isto delo sluša na svom kućnom stereo sistemu.

Upravo iz razloga koji su malopre navedeni, a koji podrazumevaju da muzika nije samo prosti zbir zvukova i tonova, ovaj zadatak je ubedljivo najteže ostvariti. S obzirom da se sva muzika i energija izvođenja nalaze u prostoru u kojem se svira, potrebno je ono što se dobija na licu mesta, u samom „vazduhu”, što vernije snimiti (u tom smislu se često koristi iznenađujuće tačna sintagma: „vazduh je najbolji mikser”). Da bi se takav jedan snimak ipak napravio, potrebno je da se steknu mnogi idealni uslovi: dobro izbalansirana kompozicija, dobri muzičari sa odličnim instrumentima, fantastičan prostor u kojem se svira i snima, visokokvalitetni mikrofoni i oprema za snimanje...pa kada se sve to skupi, uz malo eksperimenta za traženje pravog mesta za postavku mikrofona, znanja i iskustva, te određene doze sreće i vudu magije (ja zaista ne znam kojim drugim rečima da opišem neverovatne procese i situacije koji nastaju pri ovakvim događajima), možemo se eventualno nadati da će slušalac takvog jednog snimka osetiti ono „nešto” što muziku čini najmoćnijom od svih umetnosti. S obzirom da u većini slučajeva svi ovi uslovi teško mogu biti ispunjeni, pribegava se raznim „trikovima” koji imaju za cilj da učine krajnji snimak što bližim ovakvom jednom idealu.

U tu svrhu veoma često se izvestan broj mikrofona postavlja blizu određenih instrumenata, kao dodatak samom stereo paru, koji služe da „izvuku” ili naglase određene stvari u konačnom snimku, i na taj način „osvetle” ili učine prezentnijim pojedine instrumente ili delove kompozicije. Naravno, izlazni signali iz tih mikrofona se panoramski smeštaju u prostor koji inače zauzimaju tako snimljeni instrumenti u sklopu celog orkestra, s tim što se njihovo „doziranje” mora vršiti veoma pažljivo (o funkcionisanju panorama regulatora nešto više reći će biti u nastavku teksta). S obzirom da su tako dobijeni signali često i po 20-30 mS „ispred” signala koji generiše stereo par, može doći do prevelikog „iskakanja” instrumenata ispred orkestra kao celine, pogotovo ako je i nivo tog dodatnog signala

prevelik. Iz tog razloga nije redak slučaj, pogotovo u snimcima klasične muzike, da pojedini instrumenti, pa čak i solisti, bivaju preuveličani. (Ovo već potpada pod pitanje produkcije klasične muzike, što svakako ne spada u tematiku ovog rada.) Ovaj problem se ponekad na elegantan način može rešiti unošenjem vremenskog kašnjenja u signal „pojašnjavajućeg” mikrofona, sa ciljem da se vremenski približi signalu iz glavnog stereo para. Količina tog kašnjenja se može približno proračunati na osnovu formule $T = x / 340$, gde je x rastojanje od pojašnjavajućeg do bližeg mikrofona u stereo paru, izraženo u metrima, dok je potrebno kašnjenje T izraženo u sekundama.

Naravno da je korišćenjem dodatnih mikrofona znatno povećana i mogućnost menjanja boje samog zvuka, usled pojave „comb-filter” efekta. Ta promena će pogotovo biti izražena ukoliko dva ili više mikrofona hvataju približno istim nivoom zvuk jednog istog instrumenta. (Spomenimo da čak i korišćenje samo jednog mikrofona može dovesti do ovakvih „faznih” problema, ukoliko je nivo reflektovanog zvuka koji on prima dovoljno visok, što je čest slučaj ukoliko se mikrofona nalazi blizu neke reflektujuće površine (zid, pod, razni zastori, nameštaj i sl.)). Ovo je veoma česta i neželjena pojava, koja će najlakše biti izbegnuta ukoliko smo sve vreme svesni da do nje može doći. Konkretna pravila za njeno prevazilaženje ne postoje, već zavise od situacije do situacije. Pa ipak, nije loše imati na umu rezultate do kojih je svojevremeno došao istraživački tim kompanije „*Electro-Voice*”. Oni su, nakon niza eksperimenata u kojima su kombinovani razni signali sa svojim zakašnjenim replikama, došli do zaključka da kada je zakašnjeni signal 9dB nižeg nivoa od direktnog signala, odstupanja od početnog nivoa, koja nastaju kao posledica njihovog međusobnog sabiranja i oduzimanja, ne prelaze $\pm 1\text{dB}$, što je praktično nečujno. Dakle, ukoliko je nivo izlaznog signala daljeg mikrofona za 9dB niži od nivoa signala na izlazu iz bližeg mikrofona, kolorizacija zvuka koja bi nastala usled njihovog sabiranja bi trebala da bude neprimetna. Prema zakonu inverznih kvadrata, to bi značilo da međusobno rastojanje između mikrofona treba da bude najmanje 3 puta veće od rastojanja između zvučnog izvora i njemu bližeg mikrofona, ukoliko želimo da izbegnemo navedene probleme. Naravno da je i ovo samo polazna činjenica koju nije loše imati na umu, ali koju ne treba uzimati zdravo za gotovo. Konkretni nivoi izlaznih signala svakog od mikrofona zavise i od njihove karakteristike direktivnosti, mesta na kojem se nalaze i mnogih drugih parametara.



Slika 39: Ilustracija 3:1 pravila

Dodatni načini koji se mogu koristiti za izbegavanje ovog problema bi bili: približavanje mikrofona zvučnom izvoru; dodatna separacija mikrofona od mikrofona (koja može biti postignuta bilo njihovim međusobnim udaljavanjem, bilo postavljanjem akustičkih zastora ili paravana između njih); snimanje u akustički ‘‘mirnijoj’’ prostoriji (sa manjim vremenom reverberacije), u cilju smanjivanja količina reflektovanog zvuka koji hvata svaki od mikrofona ponaosob; korišćenje direktivnijih tipova mikrofona i njihovo usmeravanje u željenom pravcu; udaljavanje mikrofona od reflektujućih površina...Pa ipak, kao i u svim situacijama vezanim za snimanje muzike, i ovde je najvažnije pažljivo slušati ono što se dobija kao rezultat konkretne postavke.

„Close miking” tehnike

Zamislimo za trenutak situaciju u kojoj je potrebno snimiti jedan gudački kvartet. Ukoliko bi bili ispunjeni barem minimalni uslovi o kojima smo raspravljali malopre, verovatno bi bilo moguće napraviti pristojan snimak jednim stereo parom, uz eventualno korišćenje dodatnih mikrofona za „pojašnjavanje” nekih zvukova. Takav jedan snimak bi se odlikovao jasnom pozicijom instrumenata i osećajem originalnog prostora, što bi zvučnu sliku učinilo popunjenom i bogatom. Ukoliko bi smo isti taj kvartet snimili korišćenjem 4 posebna mikrofona, od kojih je svaki „zadužen” za po jedan instrument, dobili bi snimak koji bi se sastojao od četiri „tačke” u zvučnoj bazi, bez definisanog prostora i bez osećaja mešanja i preplitanja svih instrumenata. Ovakva zvučna slika bi se najpre mogla okarakterisati kao siromašna, i bilo bi neophodno izvršiti dosta korekcija da bi ona ipak ličila na originalnu. Iz tog razloga se pri snimanju svih vrsta muzike koje se baziraju na prirodnom zvuku, poput klasične muzike, džeza, izvornih i etno kompozicija i sl., teži formiranju zvučne slike upotrebom što manje mikrofona, u cilju prenošenja originalnog muzičkog doživljaja. Međutim, razvoj novih muzičkih formi i pravaca, pogotovo od pedesetih godina na ovamo, je doveo i do razvoja drugačijeg pristupa i same filozofije pri formiranju zvučne slike, a samim tim i do novih tehnika i tehnologija neophodnih za njeno formiranje. Ovaj proces je veoma vezan i za razvoj audiotehnike, što je dovelo do neraskidivog preplitanja muzike i tehnike, koje je pre svega oličeno kroz zanimanje muzičkog snimatelja/producenta.

Uslovi u kojima takva, uslovno rečeno popularna muzika nastaje i u kojima se snima (vrlo često su to „suvi” akustički prostori, sa relativno malim vremenima reverberacije), zatim upotreba specifičnih, vrlo često električnih instrumenata, kao i sam muzički izraz i osećaj koji se želi putem stereo zvučne slike preneti do slušaoca, usloveli su razvoj tzv. „close-miking” tehnike postavke mikrofona. Ona podrazumeva da se mikrofoni postavljaju vrlo blizu instrumenata, što dovodi do vrlo jasne i precizne definisanosti njihovog originalnog zvuka (a

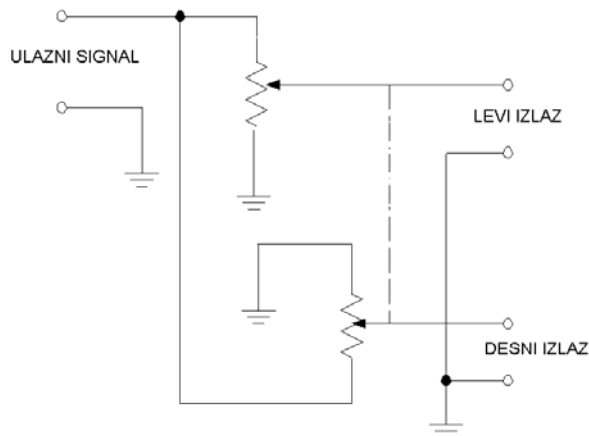
vrlo često i do stvaranja novih zvukova), ali istovremeno i do gubitka informacije o prostoru u kojem se snima i pozicioniranosti instrumenta u okviru zvučne scene, koji se naknadnim procesiranjima signala moraju rekonstruisati.

Prvo pravilo koje važi pri korišćenju ove tehnike je da ne postoje striktna pravila. Položaj mikrofona zavisi od njegovog tipa, konkretnog instrumenta, prostora u kojem se snima, načina na koji muzičar svira i mnogih drugih stvari koje su promenljive od situacije do situacije. Sa te strane bi zaista bilo iluzorno (i beskorisno) pokušati dati neka generalna pravila vezana za sam način postavljanja mikrofona. Međutim, postoje određene faze i postupci tokom korišćenja ovakve tehnike, koji se, u manjoj ili većoj meri, mogu primeniti u većini konkretnih situacija. Ovo se pre svega odnosi na tehnike procesiranja signala, koje predstavljaju bitan segment u radu prilikom ovakvog formiranja zvučne slike.

Panorama regulator

Vrlo često se „*close miking*” tehnika poistovećuje sa višekanalnim načinom snimanja. To podrazumeva da se na ovaj način dobijeni signali (faza snimanja), kojih može biti dosta (u svakom slučaju više od dva), „smeštaju” na neki od višekanalnih uređaja za snimanje. Odatle se, preko višekanalnog miksera, uvode u dalji proces obrade (tzv. faza miksovanja). U procesu miksovanja signali dobijaju svoj „konačni” izgled i mesto koje će zauzimati u okviru zvučne slike.

Pozicioniranje svakog signala posebno na željeno mesto u zvučnoj slici se zasniva na kontroli relativnog odnosa intenziteta koji takav signal ima u levom, tj. desnom kanalu. Za lakše manipulisanje signalima u tom smislu, koriste se tzv. panorama - potencijometri (‘panpot’), čiji je principski izgled prikazan na slici 40.



Slika 40: Principski shema panorama regulatora

Kao što se vidi, on ima jedan ulaz, na koji dolazi signal, i dva izlaza, za levi i desni kanal, čime se omogućuje kontinualna promena položaja VZI u okviru zvučne baze. Bitno je primetiti da oba izlazna nivoa moraju biti takva da zbirno obezbeđuju konstantnu akustičku energiju prilikom reprodukcije, bez obzira na položaj u kojem se nalazi potencijometar. Tako na primer, kada se panorama potencijometar nalazi u centralnom položaju, koji mora da obezbedi podjednak nivo signala u oba kanala, rezultujući nivoi na oba izlaza iz potencijometra moraju biti za po 3dB manji u odnosu na nivoe kada se panpot nalazi u krajnje levom, odnosno krajnje desnom položaju.

PITANJA ZA PROVERU ZNANJA

1. Kolika je intenzitetna, a kolika vremenska razlika, dovoljna da se pri reprodukciji VZI pojavi u krajnje levom (ili desnom) položaju u okviru zvučne baze?
2. Šta je to *comb* filter, i na koji način dolazi do ove pojave?
3. Šta su konicidentne stereo postavke?
4. Na koji način promena postavnog ugla koincidentnog stereo mikrofonskog para utiče na formiranje stereo zvučne slike?
5. Šta je to M-S stereo postavka?
6. Na koji način se obavlja slušanje snimka realizovanog M-S stereo parom mikrofona?
7. U kom tipu stereo postavke nema smisla koristiti mikrofone omnidirekzione karakteristike?
8. Šta je *Decca Tree* postavka?
9. Šta su ORTF i NOS postavke?
10. Koje su prednosti, a šta su mane, korišćenja close miking tehnike?
11. Šta je panorama regulator?

VREMENSKA OBRADA SINALA

III deo

Prilikom snimanja *close miking* tehnikom ne dolazi samo do separacije signala od drugih signala, već i do separacije svakog signala ponaosob od prostora u kojem se snima. Naime, mikrofoni se vrlo često nalaze toliko blizu izvora da se prostor jednostavno „ne čuje“. Naravno da to ne mora biti uvek slučaj, ali, generalno gledano, svi signali snimljeni na ovaj način moraju proći kroz manji ili veći stepen prostorne korekcije. Upotrebom sprava koje unose vremenska kašnjenja (*time delay*) i uređaja za veštačku reverberaciju, moguće je isprocesirati signale tako da zvuče, do neke mere, kao da su snimani u željenom prostoru. Rekonstrukcija originalnog, ili kreiranje nekog zamišljenog prostora, predstavlja veoma bitan momenat u procesu obrade signala, koji puno utiče na konačni izgled zvučne slike. Dodavanjem ili oduzimanjem prostora pojedinim signalima moguće je njihovo dodatno pozicioniranje, koje se pre svega odnosi na „udaljenost“ u odnosu na slušaoca, kao i na osećaj prostora u kojem se nalazi originalni zvučni izvor. Da bismo u potpunosti mogli da razumemo i primenimo ove tehnike, moramo se upoznati sa osnovnim karakteristikama koje utiču na „zvučanje“ nekog prostora. Kao posebnu grupu procesora i algoritama čiji se rad zasniva na tretiranju originalnog signala u vremenu upotrebom linija za kašnjenje i eventualnim dodavanjem modulacije sa ciljem dobijanja različitih zvučnih efekata, možemo izdvojiti tzv. specijalne efekte koji se koriste u muzičkoj produkciji. U tom smislu, u ovom poglavlju su obrađene sledeće methodske celine:

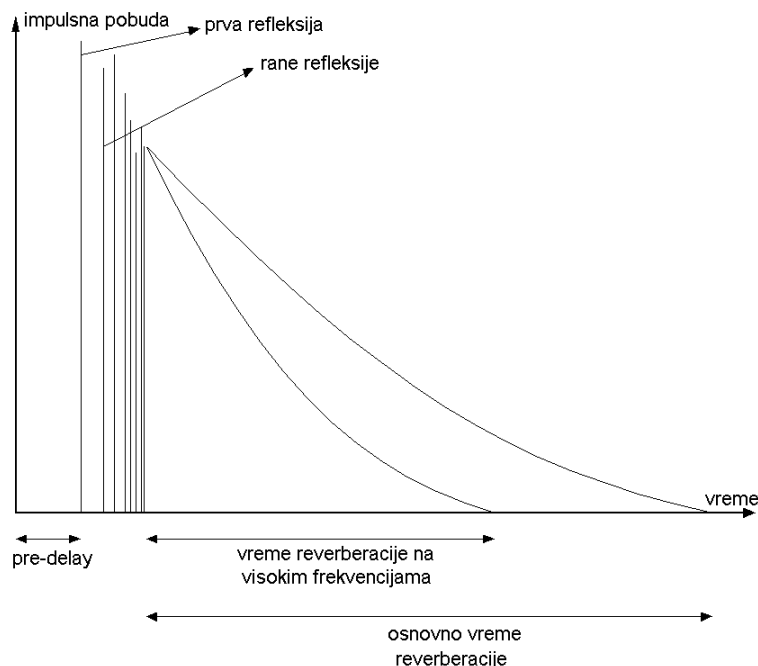
1. Zvučni prostor
2. Praktični aspekti upotrebe digitalnih uređaja za veštačku reverberaciju
3. Efekti bez modulacije
4. Efekti sa modulacijom

3.1 Zvučni prostor

Svaki zvuk, pa tako i onaj koji dolazi do mikrofona, se sastoji od tri komponente:

- Direktan zvuk;
- Prve refleksije;
- Ostale refleksije, tj. reverberacija;

Zamislimo situaciju da se u nekoj proizvoljnoj prostoriji nalaze slušalac i zvučni izvor koji generiše impulsnu pobudu. Prvi zvuk koji dolazi do slušaoca je direktan zvuk zvučnog izvora, i upravo tu činjenicu mozak koristi za određivanje položaja koji taj zvučni izvor zauzima u prostoru. (tzv. zakon „prvog talasnog fronta”). Određeno vreme nakon direktnog zvuka, do slušaoca dolazi prva refleksija, koja nastaje odbijanjem zvučnog talasa od slušaocu najbliže reflektujuće površine. Vreme koje protekne do prispeća prve refleksije veoma puno utiče na slušaočev osećaj veličine prostora u kojem se nalazi. Kraće kašnjenje predpostavlja manji prostor, a veća vremena kašnjenja veći prostor. Ova prva refleksija je praćena refleksijama zvuka od ostalih površina u prostoriji, koje sve skupa čine tzv. rane refleksije. Vreme njihovog prispeća do slušaoca i relativni odnosi njihovih amplituda zavise od tri stvari: lokacije zvučnog izvora; položaja, oblika i vrste reflektujućih površina; i mesta na kojem se slušalac nalazi. Promena bilo kojeg od ova tri parametra će dovesti i do promene izgleda polja ranih refleksija, što se veoma značajno odražava na ono što slušalac čuje. Ovakvo „rano” zvučno polje do slušaoca stiže pre nastanka difuznog zvučnog polja, koje se formira već nakon prvih par refleksija, i u mnogome određuje karakter zvučanja prostora u kojem se slušalac nalazi. U zavisnosti od intenziteta i trajanja prvih refleksija, direktan zvuk može biti promenljiv u pogledu jasnoće, glasnoće, definisanosti, prisutnosti i slično.



Slika 41: Odziv prostorije na impulsnu zvučnu pobudu

Reverberacija podrazumeva da je stvoreno difuziono zvučno polje, tj. da se zvuk odbio više puta od reflektujućih površina, tako da se slušalac nalazi u „gustom” zvučnom prostoru. Generalno govoreći, možemo smatrati da se takvo polje formira nakon 20 - 50 mS od početnog impulsa. Vreme reverberacije, koje se definiše kao vreme potrebno da akustička energija, odnosno intezitet zvuka, opadne po isključenju izvora na milioniti deo svoje prvobitne vrednosti, odnosno za 60dB, zavisi od zapremine prostorije, njenog oblika, te njenog ukupnog koeficijenta apsorpcije. Pojam optimalnog vremena reverberacije je veoma relativan, i pre svega zavisi od namene prostora i njegove zapremine. Različita muzika se stvara za različite prostore. U principu je moguće, primenom određenih tehnika, uticati na vreme reverberacije, ali generalno pravilo glasi da optimalno vreme reverberacije raste sa zapreminom prostorije. Razmotrimo to na slučaju dva prostora - crkve i neke manje sale, koji ponekad mogu imati približno slično vreme reverberacije na srednjim frekvencijama. Kao prvo, slušalac sa povezom preko očiju neće imati problema da odredi u kom se tačno prostoru nalazi, s obzirom na srazmerno veće kašnjenje prvih refleksija u većem prostoru, u ovom slučaju crkvi, dok je, kao drugo, za približno ista rastojanja od izvora do slušaoca, odnos direktnog i reflektovanog zvuka u većem prostoru veći nego u manjem, tako da je zvuk mnogo jasniji i precizniji. Upravo iz tih razloga, mali prostori koji su tako dizajnirani da imaju vreme reverberacije karakteristično za veće prostore, veoma često mogu biti neprijatni,

kako za sviranje, tako i za slušanje muzike. Manji prostori zahtevaju manje reverberacije da bi mogao da bude ostvaren odgovarajući odnos direktnog i reflektovanog zvučnog polja, dok većim prostorima treba i veća reverberacija da bi mogli da „obezbede” adekvatnu glasnoću zvuka na mestu na kojem se nalazi slušalac.

Razmotrimo neke od najvažnijih parametara subjektivnog doživljaja prostora, čije je poznavanje i razumevanje neophodno za pravilnu upotrebu uređaja za kreiranje veštačkih prostora. Njihovi nazivi su opisni, jer su vezani, pre svega, za lični doživljaj osobe koja sluša, a odnose se na:

- Intimnost prostora
- Živost prostora
- Toplinu prostora

„Intimnost” nekog prostora se odnosi na osećaj blizine slušaoca izvođačima, i pre svega je posledica prvih refleksija, koje slede 15-20mS nakon pojave direktnog zvuka. Step en ovakvog osećaja se u znatnoj meri može regulisati pravilnom kontrolom odnosa direktnog i reflektovanog zvuka koji dolazi do mikrofona. Takođe, jedan od načina za kontrolu ovog parametra je i pravilna upotreba uređaja za vremensko kašnjenje i reverberaciju.

„Živost” prostora pre svega proističe iz relativno velikog vremena reverberacije na srednjim frekvencijama (500-2000Hz), zajedno sa tipom prvih refleksija karakterističnih za ne tako velike prostore. Ovakvi prostori su, na primer, sale za ples koje imaju dosta reflektujućih površina za visoke frekvencije (poput ogledala), ali istovremeno i određenu dozu apsorpcije na niskim frekvencijama, zahvaljujući drvenim podovima i konstrukcijama na zidovima. Ovakvi prostori mogu biti odlični za potrebe snimanja muzike, pogotovo kada je moguće korigovati niskofrekventni sadržaj. Istovremeno, nije neobično ukoliko isti prostori prilikom izvođenja muzike u njima zvuče kud i kamo lošije, pre svega usled nedostatka basova. Osećaj živosti se na snimku može proizvesti veštačkim putem pre svega produžavanjem vremena reverberacije do otprilike 1.5-2S, uz istovremeno isticanje spektra u opsegu od 0.5-2KHz. Vreme do pojave prvih refleksija bi pri tome trebalo da ostane relativno kraće, s obzirom da je živost pre svega osobina nevelikih prostora.

„Toplina” prostora je pre svega povezana sa relativno velikim vremenom reverberacije na niskim frekvencijama (100-250Hz), u odnosu na opseg srednjih frekvencija. Upravo ovu osobinu prostora je najteže istaći prilikom procesiranja signala. Problem je pre svega u mogućnostima uređaja za veštačku reverberaciju: u nižem opsegu frekvencija često dolazi do neprirodne kolorizacije, koja je posledica nemogućnosti takvih sprava da imitiraju prevelike razdvojenosti prirodnih modova, odnosno rezonantnih učestanosti, koje se javljaju

u zatvorenim prostorima na nižim frekvencijama. Naime, u svakoj prostoriji, u zavisnosti od njenih dimenzija, dolazi do stvaranja stojećih talasa na karakterističnim frekvencijama, koje se vrlo često nazivaju i sopstvenim frekvencijama. Približan broj sopstvenih frekvencija, dN , koje sadrži frekventni opseg df , se može izračunati preko formule:

$$dN \approx \frac{4\pi \cdot V \cdot f^2}{c^3} \cdot df \quad (19)$$

Kao što se vidi, kako se krećemo ka višim frekvencijama, broj sopstvenih frekvencija je sve veći, razmak između njih je sve manji, pa rezonantne pojave ne utiču na promenu samog zvuka, već pre svega na njegovu glasnoću. Međutim, u opsegu nižih frekvencija su sopstvene učestanosti prilično razdvojene, i svojim rasporedom i uzajamnim odnosima direktno utiču na zvuk koji se stvara u prostoriji, dajući mu specifičan karakter koji se prepoznaje upravo kao toplina prostora. (Zanimljivo je istaći da ova karakteristika zavisi i od samog mesta u okviru prostorije, pogotovo ako direktan zvuk nije preglasan.) Iz iste formule se može uočiti da je broj sopstvenih učestanosti u istom opsegu frekvencija veći za veće prostore. Za početne proračune često se koristi stav da sopstvene učestanosti ulaze u „gušći” opseg nakon frekvencije koja je 10 puta veća od najniže sopsvene učestanosti, pri čemu je najniža sopstvena frekvencija paralelopipedne prostorije ona za koju je najveća dimenzija prostorije ravna polovini njoj odgovarajuće talasne dužine. Ukoliko uzmemo za primer neku veliku crkvu, lako se može desiti da se njena najniža sopstvena učetanost nalazi i ispod čujnog opsega, na frekvenciji od recimo 6Hz. Dakle, već na frekvencijama od 60Hz pa naviše, sopstvene frekvencije su dovoljno gusto raspoređene i ulaze u fazu „preklapanja”. Često se kaže da je do te frekvencije prostor mali, a preko nje veliki. U malim prostorijama se na niskim frekvencijama može nalaziti jako malo sopstvenih učestanosti, tako da su razlike u zvučnim pritiscima na različitim frekvencijama vrlo istaknute. Upravo to je razlog što male prostorije, poput kupatila ili kuhinje, umeju da odzvanjaju ili bubnjaju.

Iz svega navedenog je jasno da je podražavanje prostora koji imaju kvalitetan odziv u ovom delu spektra (topli prostori) veoma teško ostvariti. Umereno izdizanje niskog opsega, i mala redukcija visokog, mogu pomalo da „utople” stvar, ali generalno gledano elektronsko „grejanje” prostorije je veoma teško postići.

3.2 Praktični aspekti upotrebe digitalnih uređaja za veštačku reverberaciju

Digitalni uređaji za veštačku reverberaciju omogućavaju, sa manje ili više uspeha, formiranje željenih zvučnih prostora. Prilikom njihovog korišćenja se srećemo sa malopre opisanim pojmovima koji utiču na zvučanje svakog prostora ponaosob. Pravilna upotreba ovih uređaja podrazumeva i poznavanje njihovih konkretnih mogućnosti. Sada ćemo se pozabaviti parametrima koji se mogu sresti u radu sa ovakvim spravama.

Prvo na šta bi svakako trebalo obratiti pažnju, iako se ne odnosi direktno na problematiku kreiranja prostora, jeste pravilno podešavanje nivoa signala koji se „šalje” u spravu (*Input level control*). Ukoliko se prekorači i određeni nivo ulaznog signala, može doći do tzv. klipovanja, pri čemu A/D konvertor odlazi u „*overload*” režim. Sve to rezultuje veoma neprijatnim zvukom koji čini snimak tehnički neispravnim.

Drugi veoma bitan parametar se vezuje za kontrolu međusobnog odnosa „suvog” ulaznog signala i njegove reverberacione komponente koju mu daje sam uređaj. Ovaj odnos se označava kao „*wet/dry*”, pri čemu njegovo povećavanje podrazumeva veći procenat reverberacije u ukupnom izlaznom signalu. „*Wet*” komponenta se odnosi na reverberaciju, dok je „*dry*” ulazni, neisprocesiran signal.

Prva kontrola kojom se reguliše sama reverberacija je tzv. „*Pre-Delay Time*”. Ona se odnosi na vreme koje protekne do pojave prve refleksije, odnosno na rastojanje do prve reflektujuće površine, i samim tim veoma bitno utiče na veličinu prostora koji se kreira. Uobičajeno je da se podešavanja vrše i izražavaju u milisekundama, s tim što je opseg u kojem se pre-delay vreme može kretati veoma veliko. Generalno govoreći, to vreme ne bi trebalo da bude kraće od 8-10 mS, ukoliko se želi izbeći preveliko mešanje i preplitanje direktne i reflektovane komponente zvuka. Kašnjenje prve refleksije od 50mS pa navise ljudsko uvo oseća kao odjek, i to treba imati na umu prilikom rada.

Podešavanje „*Pre-Delay*” vremena treba da bude praćeno i adekvatnim podešavanjem broja, grupisanosti, vremena pojavljivanja, amplituda i tonalnih kvaliteta ranih refleksija. U zavisnosti od proizvođača i, pre svega, kvaliteta korišćenog uređaja, za ova podešavanja je omogućena kontrola manje ili više parametara. Veoma često su vrednosti ovih parametara formirane od strane samog proizvođača, i moguće ih je direktno koristiti (to su tzv. „*Preset*” opcije). Pa ipak, najbolje sprave omogućavaju dosta veliki stepen slobode, koji ostavlja jako puno prostora za veoma fina podešavanja. Najsofisticiranije mašine omogućuju

korisniku da specificira i zapreminu imaginarnog prostora, pa čak i njegove tačne dimenzije, zajedno sa položajem zvučnog izvora i slušaoca u njemu.

Sledeća faza u „traženju” pravog prostora se odnosi na podešavanje vremena reverberacije, dok se parametar koji to omogućuje, kao po pravilu, označava imenom „*Decay Time*”. Ukoliko krenemo od toga da je osnovno vreme reverberacije ono koje je karakteristično za srednji opseg frekvencija, jasno je da vreme reverberacije na nižim i srednjim frekvencijama moramo prilagoditi njegovom trajanju. Visoke frekvencije se znatno prigušuju, pa je i vreme reverberacije u tom opsegu srazmerno kraće. Izraz „visoke frekvencije” se u ovom slučaju odnosi na opseg od 2-3 KHz pa naviše, a nije redak slučaj da je vreme reverberacije tog opsega i do 50% kraće od osnovnog. Ova vrednost se obično reguliše tzv. „*Hi-ratio*” parametrom. Normalna reverberacija ima smisla do nekih 5-6 KHz, jer je na višim frekvencijama apsorpcija toliko izražena da je teško govoriti o postojanju vremena reverberacije. Što se tiče niskih frekvencija, nije zgoreg primetiti da fini prostori vrlo često imaju vreme reverberacije oko 1.2 puta duže od osnovnog. Problemima o kojima smo do sada diskutovali vezano za kreiranje veštačkih prostora, svakako bi trebalo dodati i činjenicu da prirodni prostori nemaju granične frekvencije na kojima se seku, na ovaj ili onaj način, vremena reverberacije. Sve su to razlozi iz kojih je dobar prirodni prostor neprevaziđena „sprava” koju treba koristiti kada god je to moguće.

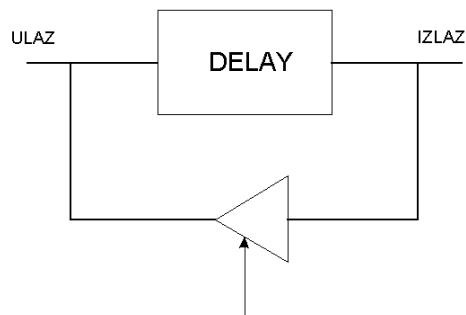
3.3 Specijalni efekti

3.3.1 Efekti bez modulacije

Uređaji za veštačku reverberaciju su kompleksni elektronski sklopovi, čiji se princip rada bazira na vremenskom kašnjenju signala. Naime, određeni broj refleksija osnovnog signala se simulira linijom za kašnjenje (taj broj varira od desetak za jeftinije, do pedesetak refleksija za najkvalitetnije sprave), a onda se vrši njihovo međusobno „kombinovanje” i procesiranje po zadatom algoritmu. Dakle, u samoj osnovi ovog uređaja se nalazi vremensko kašnjenje signala, tzv. „*time delay*”. S obzirom da se većina efekata koji se koriste u procesu obrade zvuka zasniva upravo na vremenskom kašnjenju, ne bi bilo loše razmotriti osnovne parametre i načine upotrebe sprava za generisanje vremenskog kašnjenja, kao i efekata koji se iz njih izvode.

Svi „specijalni” efekti vezani za vremensku obradu signala se zasnivaju na kašnjenju osnovnog signala. U prvo vreme se radilo sa magnetnim trakama. Više magnetofona čije se trake kreću različitim brzinama su se koristili za kombinovanje i generisanje različitih vremenskih kašnjenja. Pri korišćenju manjih brzina, kašnjenja su bila reda veličine 200-300 mS, dok se upotrebom većih brzina moglo ostvariti kašnjenje i od 20 mS. Za potrebe postizanja specifičnog eho efekta, koji zapravo predstavlja višestruko kašnjenje, tj. ponavljanje osnovnog signala, su se koristili magnetofoni sa nekoliko glava za reprodukciju, pri čemu se najčešće radilo sa manjim brzinama kretanja trake. Međutim, ubrzanim razvojem digitalne tehnologije, od početka osamdesetih na ovamo, u većini slučajeva se koriste digitalni uređaji za kašnjenje signala.

Digitalno kašnjenje se generiše kroz proces vođenja digitalnog audio signala u bafer, u kojem se zadržava određeno vreme, koje je moguće varirati po potrebi. Nakon isteka specificiranog vremena signal se šalje na izlaz sprave, u dalji tok obrade. Za potrebe formiranja eha, pribegava se vraćanju signala preko povratne sprege na ulaz, čime se on ponovo uvodi u liniju za kašnjenje (slika 42).



Slika 42: Princip funkcionisanja eho efekta

Dakle, dva najvažnija parametra pri upotrebi "time delay" uređaja su vreme kašnjenja i količina fidbeka, odnosno procenat signala koji vraćamo na ulaz. Prema vrednostima vremena kašnjenja moguće je izvršiti podelu efekata na:

- „*Comb filter*” efekat, o kojem je već bilo reči. Vremena kašnjenja koja se primenjuju za njegovo generisanje se kreću u opsegu od 1mS (pa čak i manje), pa negde do 3mS. Pri tako malim vremenima kašnjenja dolazi do faznih pomaka između originalnog i zakašnjenog signala, što, iz već objašnjenih razloga, dovodi do promene boje zvuka. Ljudsko uvo ovako mala kašnjenja ne može precizno razlikovati. Tačno vreme kašnjenja pri kojem uvo može da uoči da postoji i zakašnjeni signal nezavisno od osnovnog nije tačno definisano, i zavisi od vrste i karaktera samog zvuka. Za perkusivne zvuke ta granica se nalazi negde oko 20mS, dok za neke druge vrste zvukova može biti pomerena i na 50-60mS.

- „*Duplex*” efekat stvara utisak dupliranja zvuka. Tipična vremena kašnjenja potrebna za njegovo generisanje, u zavisnosti od vrste zvuka, kreću se od 15-30mS. Ako se koriste veća kašnjenja efekat je izraženiji. Korišćenje ovog efekta teško može da zavara slušaoca da su zaista odsvirana dva instrumenta, već se više koristi za postizanje specifične atmosfere.

- „*Slap echo*” ima za cilj da simulira eho koji se oseća u velikim prostorima, poput hala i pećina, u kojima dolazi do odbijanja zvuka od udaljenih zidova. Vreme kašnjenja se kreće od 100 do 200 mS. Najčešće se koristi samo jedno kašnjenje, ali je moguće koristiti i određeni, ne veliki, procenat povratne sprege.

3.3.2 Efekti sa modulacijom

Zajedničko za sve do sada opisane efekte je to što im je vreme kašnjenja, kada se jednom podesi, konstantno. Međutim, postoji grupa efekata koja se zasniva na modulaciji tog vremena, koje se menja u ritmu nekog osnovnog signala. To su tzv. efekti sa modulacijom, a principska blok šema njihovog funkcionisanja je prikazana na slici 43.

Oblici signala na izlazu niskofrekventnog oscilatora (LFO) mogu biti različiti (sinusoidalni, četvrtasti, testerasti itd.), a njihovi parametri koji podležu promeni su najčešće frekvencija i procenat, odnosno dubina modulacije. Tako na primer, ukoliko imamo osnovno vreme kašnjenja od 50mS, i ukoliko ga modulišemo sinusnim signalom frekvencije 1Hz, sa procentom modulacije od 10%, kao rezultat ćemo dobiti vreme kašnjenja koje se menja u granicama od 45-55 mS, pri čemu jedan ciklus promene traje tačno jednu sekundu. Efekti sa modulacijom se, pre svega u odnosu na trajanje osnovnog vremena kašnjenja i načina na koji utiču na zvučanje osnovnog signala, mogu podeliti na sledeće karakteristične grupe:

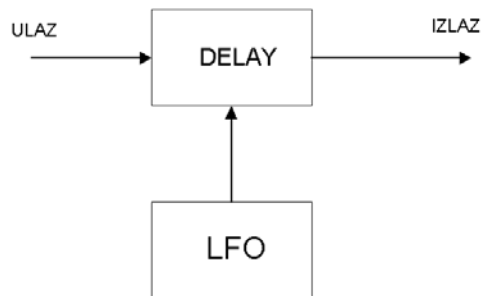
- „*Phaser*” je efekat koji predstavlja modulisani „comb filter”. Modulacija je proizvoljna, a osnovno vreme kašnjenja se nalazi u granicama od 2 do 4mS.

- „*Flanger*” je efekat kod kojeg je osnovno vreme kašnjenja 8-12mS, što dovodi do zvuka kod kojeg se osećaju promene u boji usled faznih pomeraja, ali se istovremeno nazire i dupliranje.

- „*Chorus*” je efekat kod kojeg se već oseća blago raštımavanje. Osnovno vreme kašnjenja je 15-25mS. U fazi smanjivanja ovog vremena oseća se povećanje visine tona, dok se pri njegovom povećanju oseća smanjivanje visine. Ovakvo ponašanje je moguće objasniti preko doplerovog efekta.

- „*Vibrato*” podrazumeva upotrebu vremena kašnjenja od 20 do 40mS, pri čemu se izlaz iz efekta ne kombinuje sa originalnim signalom. Obično se koriste modulacije sa frekvencijom oscilovanja od 2Hz i više.

- „*Harmonizer*” je ime dobio po firmi koja ga je prva izbacila na tržište, a danas se isti efekat sreće pod imenom „pitch shifter”. Ovde nema oscilovanja oko osnovne vrednosti vremenskog kašnjenja, već se frekvencija osnovnog zvuka pomera za određeni, fiksni iznos. Princip rada se zasniva na doplerovom efektu, što podrazumeva da se za potrebe povećanja frekvencije mora obezbediti da se vreme kašnjenja non-stop smanjuje (kao da se izvor sve vreme približava), dok smanjenje frekvencije zahteva da se omogući da vreme kašnjenja sve vreme raste, čime se stiče utisak da se zvučni izvor konstantno udaljava od slušaoca.



Slika 43: Princip rada efekata sa modulacijom

Svi navedeni efekti se mogu kreirati sa velikim stepenom slobode, pri čemu pomenuta vremena kašnjenja nisu fiksna, već zavise od konkretnog cilja koji se želi postići i samog signala koji se obrađuje. Svi nabrojani efekti, sa ili bez modulacije, se mogu koristiti kako za kreiranje veštačkih akustičkih okruženja, tako i za dobijanje potpuno novih zvukova. Neki od njih su nezaobilazni u procesu obrade zvuka. Na primer, zvuk koji nije prošao kroz određenu dozu prostorne obrade (reverb ili „time delay”) može imati sve karakteristike snimljenog instrumenta, ali neće imati dubinu, prostornost i ostale parametre potrebne za formiranje kvalitetne zvučne slike. Upravo upotrebom ovih efekata moguće je vršiti raspoređivanje VZI po „dubini” zvučne slike. Najčešće se zvuci u većem prostoru osećaju kao da su „dalji” od

onih koji su smešteni u manji prostor. Ovo je veoma suptilan način za prostorno formiranje zvučne slike koji podrazumeva duboko razumevanje procesa i uređaja koji to omogućuju. Uplivom digitalne tehnologije i *Hi-Fi* tehnike, čime je (teoretski) omogućena reprodukcija u dinamičkom opsegu od 96dB, do izražaja su došla upravo pitanja vezana za najfinija preplitanja prostora, njihovo trajanje i boju, koji su uspeali da se „izdignu” iznad šuma ploče, odnosno trake. Čitav niz zvučnih „događanja” koja se nalaze iza osnovne zvučne slike je postao vrlo bitno područje interesovanja muzičke produkcije, dajući dodatni značaj kvalitetu i načinu upotrebe sprava za prostornu obradu signala.

PITANJA ZA PROVERU ZNANJA

1. Na koji način se zvučno polje formira u vremenu?
2. Na kojim principima se zasniva rad uređaja za veštačku reverberaciju?
3. Koji su osnovni parametri koji su sreću u radu sa uređajima za veštačku reverberaciju?
4. Šta je linija za kašnjenje?
5. Koji efekti spadaju u grupu efekata bez modulacije?
6. Šta su efekti sa modulacijom?

UREĐAJI ZA OBRADU DINAMIKE AUDIO SIGNALA

IV deo

Obrada dinamike audio signala je postupak automatske kontrole nivoa tretiranog signala. Ovaj tip obrade se koristi kao standardna procedura u radu sa audio signalima, koja utiče kako na tehničku ispravnost signala koji se obrađuje, tako i na njegovu estetsku dimenziju. Krajnji ishod ovog tipa obrade je određen parametrima koji utiču na rad elektronskih sklopova koji tu obradu vrše, ali i konkretnim karakteristikama signala koji se obrađuje. Ovaj deo udžbenika ima za cilj da čitaoca upozna sa osnovnim pojmovima i problemima na koje se nailazi pri radu sa uređajima za obradu dinamike audio signala, ali i sa osnovnim principima koji se koriste prilikom projektovanja ovog tipa uređaja, čije razumevanje treba da omogući dodatnu efikasnost u svakodnevnom opertaivnom radu. Poglavlje je podeljeno u sledeće celine:

1. Podela uređaja za obradu dinamike signala
2. Povezivanje uređaja za obradu dinamike signala u audio lanac
3. Uređaji za smanjenje dinamičkog opsega
4. Diodni ograničavač signala
5. Ograničavači sa povratnom spregom
6. Vremenske konstantne povratne sprege kola za obradu dinamike
7. Obrada dinamike signala po frekvencijskim podopsezima
8. Uređaji za proširivanje dinamike
9. Primeri upotrebe gejta i kompresora u muzičkoj produkciji

4.1 Podela uređaja za obradu audio signala

U kolima koja ne vrše nikakav uticaj na nivo signala, izlazni nivo signala je jednak ulaznom nivou. Grafička predstava ovakve zavisnosti izlaznog (Y osa) i ulaznog napona (X osa) je definisana pravom koja zaklapa ugao od 45° sa osama (sl. 44) Na grafiku se jasno može uočiti da se promena ulaznog napona od npr. 3 dB preslikava u istu toliku promenu napona na izlazu. Uobičajeno označavanje ovakvog odnosa ulaznog i izlaznog nivoa signala je 1:1.

Uređaji koji vrše obradu dinamike audio signala se mogu svrstati u dve osnovne grupe:

(1) Uređaji koji smanjuju dinamički opseg signala na izlazu u odnosu na ulaz uređaja.

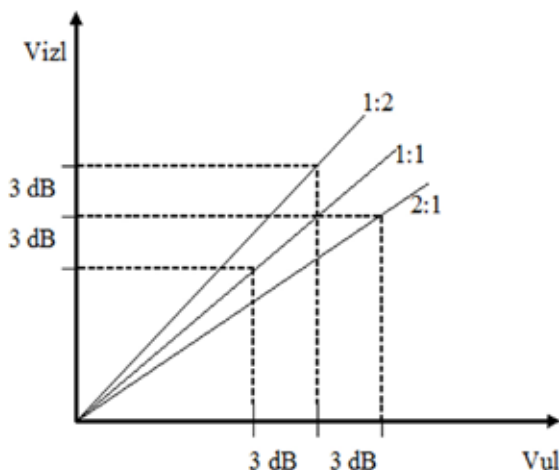
Taj proces se realizuje postupkom potiskivanja signala. Praktična upotreba ovakvih elektronskih sklopova podrazumeva i mogućnost definisanja onog nivoa signala iznad kojeg proces potiskivanja počinje. Taj nivo se naziva nivo praga. (engl.- *threshold* – prag.)

(2) Uređaji koji povećavaju dinamički opseg signala na izlazu u odnosu na ulaz uređaja.

Taj postupak se takođe zasniva na potiskivanju signala, sa tom razlikom što se ovog puta potiskuju signali koji se po nivou nalaze ISPOD nivoa praga. Na taj način se „tiši“ signali čine još „tišim“, tj. dinamički opseg je povećan.

Zavisnost izlaznog i ulaznog napona uređaja koji smanjuju dinamički opseg signala grafički je predstavljena pravom koja zaklapa ugao manji od 45° sa X osom (slika 45). Na slici je predstavljena konkretna situacija pri kojoj se promena ulaznog napona od 6dB preslikava u promenu izlaznog napona od 3dB. Uređaji koji vrše ovakav tip obrade nazivaju

se kompresori. Uobičajeno označavanje ovakvog odnosa ulaznog i izlaznog nivoa signala je 2:1. Ovaj relativni odnos dinamičkog opsega signala na ulazu i signala na izlazu iz uređaja se naziva stepen kompresije (engl. - *ratio*).

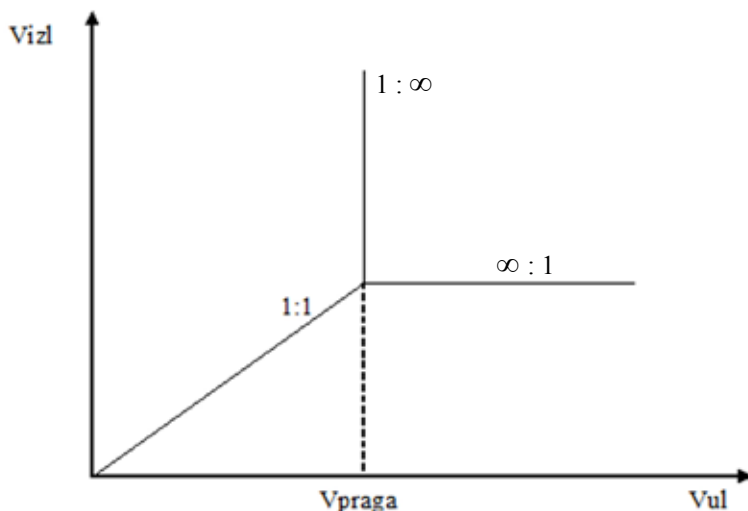


Slika 44: Grafička predstava zavisnosti izlaznog i ulaznog napona uređaja za obradu dinamike audio signala

Uređaj koji automatski registruje nivo signala, i koji ima mogućnost da taj nivo kontroliše i spušta ispod unapred definisanog kritičnog nivoa - praga, naziva se limiter, dok se ovaj tip obrade dinamike naziva limitovanje signala. Limiteri za prevashodni cilj imaju potpuno potiskivanje signala koji prekoraču je nivo praga, i mogu se okarakterisati stepenom kompresije $\infty:1$. Grafička predstava ovog odnosa kompresije je karakterisana pravom paralelnom sa X osom. U praksi se svaki uređaj sa odnosom kompresije većim od 10:1 može nazvati limiterom.

Zavisnost izlaznog i ulaznog napona uređaja koji povećavaju dinamički opseg signala je predstavljena pravom koja zaklapa ugao veći od 45° sa X osom (slika 45). Na slici je predstavljena konkretna situacija pri kojoj se promena ulaznog napona od 3dB preslikava u promenu izlaznog napona od 6dB. Uobičajeno označavanje ovakvog odnosa ulaznog i izlaznog nivoa signala je 1:2. Uređaji koji vrše ovaj tip obrade nazivaju se ekspanderi, dok se relativni odnos dinamičkih opsega na ulazu i izlazu iz uređaja naziva stepen ekspanzije.

Uređaj koji ima teoretski odnos ekspanzije $1:\infty$ vrši potpuno potiskivanje signala koji se po nivou nalazi ispod unapred zadatog nivoa praga. Ovo je praktično propusnik signala koji po nivou prekoračuju prag. Grafička predstava ovog tipa obrade je karakterisana pravom paralelnom sa Y osom. U praksi se svaki uređaj sa odnosom ekspanzije većim od 1:10 može okarakterisati kao propusnik signala.



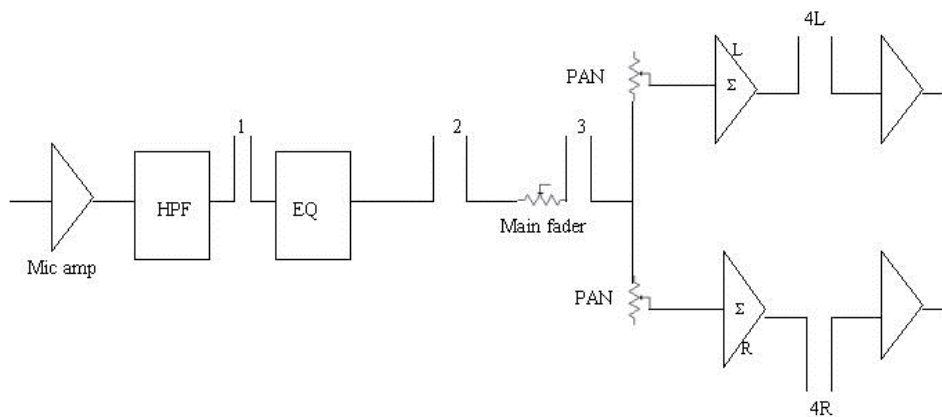
Slika 45: Grafička predstava procesa limitovanja ($\infty:1$) i propuštanja signala iznad nivoa praga ($1:\infty$)

4.2 Povezivanje uređaja za obradu dinamike audio signala u audio lanac

Elektronski sklopovi koji vrše ovaj tip obrade se proizvode kao nezavisni uređaji, ali je danas sve češće slučaj da se, upravo zbog važnosti i zastupljenosti u radu, ugrađuju u same audio miksera kao sastavni deo toka signala kroz svaki kanal miksera ponaosob. U slučajevima da se u radu ipak koriste eksterni uređaji za obradu dinamike signala, njihovo povezivanje u audio lanac se kao po pravilu vrši preko audio miksera. U te svrhe dizajn miksera podrazumeva obavezno postojanje tzv. insertnih tačaka, odnosno priključnih mesta koja obezbeđuju redno vezivanje uređaja za obradu dinamike u tok signala u svakom kanalu ponaosob. Ovakav pristup je neophodan zbog same prirode obrade dinamike audio signala, koja podrazumeva posebna podešavanja parametara obrade za svaki od signala koji se obrađuje. Korišćenje jednog elektronskog sklopa za obradu dinamike više različitih audio signala nema smisla, jer svaki audio signal ima specifičnu, samo sebi svojstvenu dinamiku.

Insertne tačke se, u zavisnosti od dizajna i koncepcije miksera, mogu nalaziti pre ili posle filterske sekcije u kanalu. I jedna i druga koncepcija imaju svoje razloge za i protiv. Smeštanje insertnih tačaka odmah nakon ulazne sekcije u kanal (tačka 1 na slici 3) ima svoje opravdanje u činjenici da se signal na dinamičku obradu šalje pre procesa filtriranja, koji često može dovesti do znatne promene nivoa pojedinih delova spektra signala. Na taj

način se eliminiše potreba za naknadnim podešavanjima parametara obrade dinamike nakon svake intervencije koja se eventualno vrši filterskom sekcijom. Ukoliko u ulaznoj sekciji kanala na mikseru postoji filter propusnik visokih učestanosti, insertne tačke se pozicioniraju nakon njega. Na taj način korisniku se omogućava uklanjanje eventualnih niskofrekventnih smetnji koje nisu sastavni deo audio signala od interesa. Takve smetnje ponekad mogu biti visoke po nivou, što može dovesti do nepotrebnog pobuđivanja elektronskog sklopa koji vrši dinamičko procesiranje. Pozicioniranje insertnih tačaka nakon filterske sekcije, s druge strane, omogućava kontrolu signala koji je prošao kompletnu obradu u kanalu. Ove tačke se postavljaju neposredno pred glavni potenciometar u kanalu (tačka 2 na slici 46), i obično se koriste kada postoji potreba za automatskom kontrolom pojačanja. Pozicioniranje insertnih tačaka nakon glavnog potenciometra u kanalu (tačka 3 na slici 46) se takođe može pronaći kao rešenje na starijim tipovima audio miksera, ali je danas taj koncept praktično potpuno napušten kao izrazito nepraktičan. Naime, svaka promena nivoa koja se reguliše glavnim potenciometrom direktno utiče na nivo signala na ulazu u uređaj za obradu dinamike, što zahteva i odgovarajuće izmene parametara obrade dinamike audio signala. Moderan dizajn audio miksera podrazumeva postojanje insertnih tačaka i na grupnim šinama, kao i na glavnim izlaznim šinama na mikseru, što predstavlja dodatan kvalitet i omogućuje veću fleksibilnost u radu (tačka 4 na slici 46).



Slika 46: Tipične pozicije insertnih tačaka: 1. Pre filterske sekcije; 2. Posle filterske sekcije; 3. Posle glavnog potenciometra; 4. Na grupnim šinama.

4.3 Uređaji za smanjenje dinamičkog opsega signala

Sa aspekta istorijskog razvoja uređaja za obradu dinamike signala, uređaji za smanjenje dinamičkog opsega su bili sklopovi koji su prvi razvijani. To nikako ne treba da čudi, jer je potreba za uređajima tog tipa u sklopu audio lanaca oduvek bila izrazito velika, i to u sledeće bitne svrhe:

- **Zaštita audio sistema:** Svaki audio sistem ima potrebu za zaštitom od preopterećenja signalom. Ovakvu zaštitu veoma efikasno obezbeđuju limiteri. Dovoljno je napomenuti da nijedna radio stanica AM tipa nije bila zamisliva bez limitera koji se u lanac povezivao neposredno ispred predajnika signala, čije se preopterećenje signalom nije smelo dozvoliti ni u kom slučaju.

- **Ispravan rad audio sistema:** Svaki audio uređaj ima jasno definisan dinamički opseg ispravnog rada. U anglosaksonskoj literaturi se veličina koja opisuje taj opseg označava kao headroom. Ovaj opseg je definisan kao razlika maksimalnog dozvoljenog i nominalnog nivoa signala definisanog za dati uređaj, i izražava se u decibelima. Stoga je očigledna potreba za uređajima koji mogu smanjiti dinamički opseg signala koji se dovodi na ulaz audio uređaja, i na taj način ga prilagoditi njegovom headroom-u. U te svrhe su razvijani elektronski sklopovi danas poznati kao kompresori, koji su postali sastavni deo većine audio lanaca.

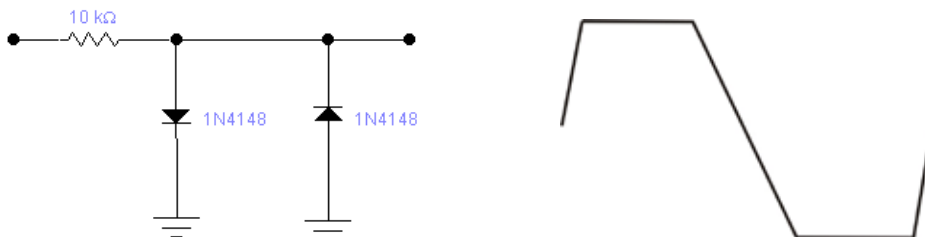
- **Specifičan način na koji ovi uređaji tretiraju audio signal** je omogućio njihovu upotrebu ne samo u svrhe zaštite i ispravnog rada sistema, već i u kreativne svrhe postizanja određenih efekata i tipova zvukova u procesu formiranja zvučne slike.

4.3.1 Efekti sa modulacijom

Verovatno najčešće korišćen tip obrade dinamike audio signala je automatsko ograničavanje nivoa - limitovanje. Elektronski sklopovi za ovakvu regulaciju nivoa su upravo iz tog razloga prvi počeli da se razvijaju i koriste u praksi, i na osnovu njihovog dizajna i konceptijskih rešenja su razvijeni i svi ostali tipovi uređaja za obradu dinamike audio signala koji se danas koriste u praksi. Upravo to je razlog zbog kojeg ćemo se malo detaljnije posvetiti njihovoj praktičnoj realizaciji.

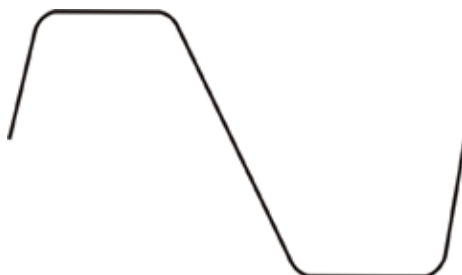
Na slici 4 je prikazan konceptijski bazičan tip elektronskog sklopa kojim se vrši limitovanje. Radi se o paru tzv. back-to-back dioda. Ukoliko diodni napon, bilo u negativnom, bilo u pozitivnom delu poluperiode, prekorači vrednost probojnog napona diode (0.6V-0.7V), jedna od dve diode će provesti i postaviti vrednost izlaznog napona na konstantnu vrednost $+V_d$ ili $-V_d$. Ovakav način limitovanja dovodi do velikih izobličenja signala, ali je krajnje

efikasan. Ukoliko se za isti sklop iskoriste germanijumske diode, dobijamo kolo koje ima niži prag osetljivosti (probojni napon ovih dioda je 0.2V-0.3V), ali istovremeno i nešto „finiju” karakteristiku odsecanja pikova (sl.5), čime se donekle umanjuje efekat čujnih izobličenja.



Slika 47: Diodni ograničavač nivoa signala sa prikazom odziva izlaznog napona na sinusoidalnu pobudu

Na slici 47 je prikazan konceptijski bazičan tip elektronskog sklopa kojim se vrši limitovanje. Radi se o paru tzv. back-to-back dioda. Ukoliko diodni napon, bilo u negativnom, bilo u pozitivnom delu poluperiode, prekorači vrednost probojnog napona diode (0.6V-0.7V), jedna od dve diode će provesti i postaviti vrednost izlaznog napona na konstantnu vrednost $+V_d$ ili $-V_d$. Ovakav način limitovanja dovodi do velikih izobličenja signala, ali je krajnje efikasan. Ukoliko se za isti sklop iskoriste germanijumske diode, dobijamo kolo koje ima niži prag osetljivosti (probojni napon ovih dioda je 0.2V-0.3V), ali istovremeno i nešto „finiju” karakteristiku odsecanja pikova (sl.48), čime se donekle umanjuje efekat čujnih izobličenja.

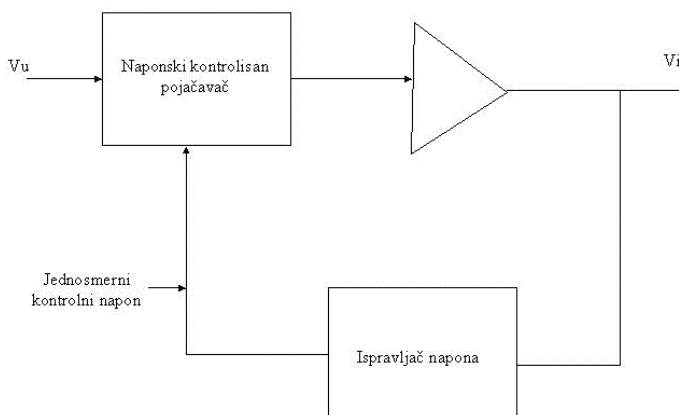


Slika 48: Izgled odziva izlaznog napona diodnog ograničavača nivoa signala na sinusoidalnu pobudu – germanijumske diode

U situacijama gde sam kvalitet krajnjeg zvuka nije od presudnog značaja, već se insistira na zaštiti sistema od preopterećenja nivoom signala, ovo jednostavno rešenje nalazi svoju primenu. To je razlog zbog kojeg se zaštitna kola ovakvog tipa i danas mogu sresti u sistemima za govornu komunikaciju, gde imaju zadatak da odsecaju pikove u govoru veće od desetak decibela u odnosu na nominalni nivo sistema.

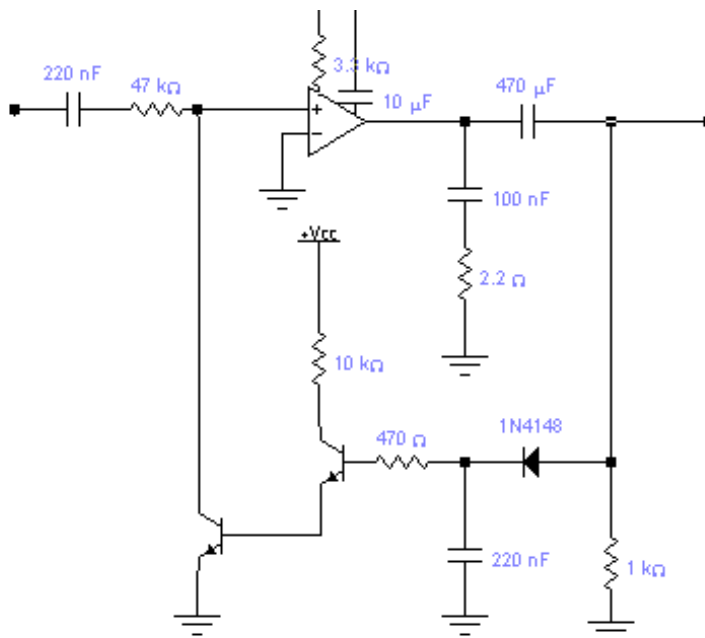
4.3.2 Ograničavači nivoa sa povratnom spregom

Mnogo efikasniji ograničavač nivoa signala bio bi onaj elektronski sklop koji bi bio u stanju da „oseti” da će ulazni nivo signala preći unapred zadati nivo praga i koji bi mogao efikasno da smanji taj nivo, tako da se signal što manje izobliči, istovremeno održavajući nivo signala što bliže pragu. Blok šema na slici 49 je principski prikaz ovako opisanog sklopa. Kolo povratne sprege u ovakvim sklopovima, (engl. sidechain), generiše kontrolni signal onog trenutka kada signal na izlazu iz pojačavača dostigne prethodno zadatu vrednost praga. Ovaj jednosmerni kontrolni napon utiče na rad naponski kontrolisanog pojačavača, i to tako što obara njegovo pojačanje, time obarajući i nivo izlaznog signala na vrednost ispod nivoa praga. Kada je ulazni nivo signala iznad nivoa praga celo kolo funkcioniše u povratnoj sprezi tako što se prati promena ulaznog nivoa signala: veći ulazni nivo, tj. veći nivo potencijalnog prekoračenja praga generiše veći kontrolni signal, koji obezbeđuje veće obaranje ulaznog nivoa. Za nivoe ulaznog signala koji se nalaze ispod praga ne generiše se kontrolni signal, tj. kolo funkcioniše kao običan pojačavač.



Slika 49: Blok šema ograničavača nivoa sa povratnom spregom

Na slici 50 je prikazana šema kola koje predstavlja konkretnu realizaciju jednog od prostijih limitera sa povratnom spregom. Ovo rešenje datira iz sredine šezdesetih godina prošlog veka, kada ga je firma *Philips* koristila u svojim ranim verzijama kasetofona. Korišćeni operacioni pojačavač (LM386) je obično bio korišćen kao pojačavač za slušalice ili manje zvučnike, obezbeđujući pojačanje od oko 30dB, a u ovom kolu je našao primenu pre svega zbog pojačavača snage u izlaznom stepenu koji je iskorišćen za napajanje diodnog ispravljača u kolu povratne sprege. Kada napon tačke A poraste iznad nivoa probojnog napona diode (oko 0.7V), dioda provede i počne da puni kondenzator Ct. Dioda je opterećena *emitter follower* tranzistorom TRf, koji napaja tranzistor TRg koji ima ulogu da kontroliše nivo pojačanja (*gain controlling transistor*).



Slika 50: Limiter sa povratnom spregom

4.3.3 Vremenske konstante povratne sprege kola za obradu dinamike audio signala

U povratnoj sprezi opisanog kola se kondenzator C_t prazni preko tranzistora i puni preko diode. Drugi tipovi kola podrazumevaju drugačija konstrukciona rešenja, ali sva ona u sebi poseduju kondenzatore koji se pune i prazne brzinama koje su određene vremenskim konstantama posmatranih kola. Neizbežno postojanje tih vremenskih intervala u mnogome definiše rad kola, što u krajnjoj instanci utiče na signal koji takvo jedno kolo tretira. Vreme potrebno da se uspostavi režim rada u kojem kolo počinje da potiskuje signal nakon trenutka prekoračenja praga se naziva vreme reakcije (engl. *attack time*), dok se vreme koje je potrebno da prođe da bi kolo prestalo da vrši potiskivanje nivoa ulaznog signala nakon što on padne ispod zadatog praga naziva vreme otpuštanja (engl. *release time*).

Postavlja se pitanje zbog čega se u igru uvode vremena kašnjenja, ako je primaran cilj limitovanja zaštita od preopterećenja? Diodni ograničavači su upravo primer kola koja nemaju kašnjenje, tj. reaguju praktično trenutno na prekoračenje praga. Kaže se da ovo kolo ima vreme reakcije nula (engl. *zero attack time*). Slično tome, nakon pada ulaznog nivoa signala ispod praga ovaj sklop praktično trenutno ulazi u normalan mod rada, tj. vreme otpuštanja je praktično nula. Problem sa ovakvim rešenjem je, pre svega u tome što ovakav način rada

dodvodi do velikog izobličenja originalnog signala, tj. zvuk koji u krajnjoj instanci proizvode ovakvi sklopovi ne odiše kvalitetom.

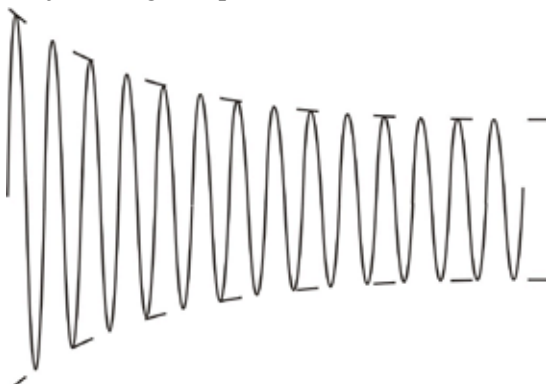
Vreme reakcije

U trenucima prelaska signala preko nivoa praga, potrebno je da protekne vreme da bi kolo počelo da vrši potiskivanje signala. Ukoliko su vremena reakcije kratka, efekat potiskivanja je izraženiji, dok duža vremena reakcije obezbeđuju odloženo, postepenije uspostavljanje potiskivanja. Kao posledica toga, kratka vremena reakcije bivaju čujno bolje detektovana, usled postojanja nagle promene u nivou signala. Tome još više ide u prilog i činjenica da se radi o signalima visokih nivoa, koji prelaze nivo praga.

Duža vremena reakcije obezbeđuju manje čujan efekat potiskivanja signala, ali se u tom slučaju suočavamo sa činjenicom da se signal duže vremenski zadržava iznad nivoa praga. Ovo je pogotovo problem u situacijama kada se sistemi štite od preopterećenja nivoom signala postupkom limitovanja, gde propuštanje pikova signala može prouzrokovati probleme.

Jasno je da će signali propušteni kroz sklop sa dužim vremenom reakcije biti manje izobličeni, a samim tim će zadržati više karakteristika originalnog zvuka. Na slici 8 je prikazan uticaj produžavanja vremena reakcije na veći broj ciklusa. Duža vremena reakcije postepeno dovode do uspostavljanja procesa potiskivanja, tj. potrebno je da prođe više vremena dok se ulazni signal potpuno iskontrolise.

Dakle, kola sa dužim vremenima reakcije manje „oštećuju” ulazni signal, ali istovremeno propuštaju ulazni signal iznad zadatog praga sve dok se proces potiskivanja ne uspostavi. Uspostavljanje balansa između ovog prekoračenja po nivou koje je sve izraženije sa povećanjem vremena reakcije i izobličenja signala koje je sve izraženije sa smanjenjem vremena reakcije je stvar subjektivnog kompromisa.



Slika 51: Postepeno slabljenje signala na izlazu iz limitera za duža vremena reakcije

Posebnu pažnju treba obratiti na činjenicu da je efekat vremena reakcije na izobličenje signala frekvencijski zavisao. Signali nižih frekvencija, sa dužim vremenima trajanja ciklusa, i signali viših frekvencija, sa kraćim trajanjem ciklusa, isto vreme reakcije „vide“ na drugačiji način. Vreme reakcije od 5mS podrazumeva prolazak 5 ciklusa signala frekvencije 1000 Hz ($T=1\text{mS}$), što se može, u nekim slučajevima, smatrati sporim. Sa druge strane, isto ovo vreme reakcije podrazumeva uspostavljanje procesa potiskivanja već nakon pola ciklusa signala frekvencije 100Hz, što je poprilično brzo.

Kao posledica ovakvog razmatranja može se lako zaključiti da odgovarajuće podešeno vreme reakcije za signale visokih frekvencija lako može biti prekratko za signale nižih frekvencija, i obratno: adekvatno vreme reakcije za signale nižih frekvencija je, kao po pravilu, nepotrebno dugačko za signale viših učestanosti.

Vremena reakcije se mere i izražavaju u mikro ili milisekundama. To su zapravo vremenske konstante punjenja kondenzatora u kolu povratne sprege, koje aproksimativno odgovaraju vremenima potrebnim da se tranzijenti u signalu stave pod kontrolu u procesu limitovanja. Vreme reakcije se ponekad izražava i u „dB/mS“, što je zapravo mera brzine potiskivanja signala.

Vreme otpuštanja

Vreme otpuštanja je ono vreme koje je potrebno da prođe da kolo, nakon pada ulaznog signala ispod nivoa praga, prestane da vrši slabljenje signala.

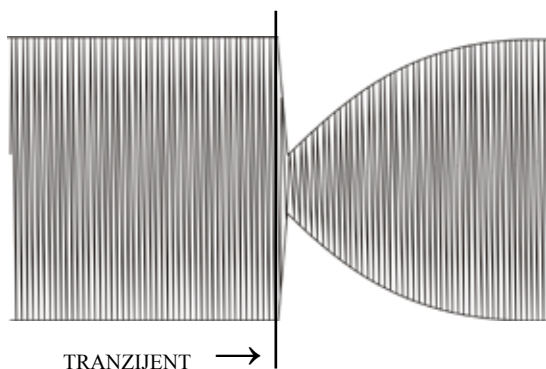
Ukoliko je signal na ulazu u elektronski sklop koji vrši potiskivanje sinusoida koja u određenim vremenskim intervalima po nivou prelezi prag, i ukoliko je vreme otpuštanja prekratko, dolaziće do pojave pri kojoj neposredno nakon pada signala ispod praga prestaje slabljenje, tj. dolazi do obnavljanja početnog nivoa pojačanja. To dovodi do toga da oni delovi sinusoide u okviru jedne njene periode koji se nalaze ispod praga bivaju veštački izdignuti po nivou u odnosu na one delove sinusoide u okviru iste periode koji se nalaze iznad praga. Ova pojava predstavlja izobličenje originalnog, ulaznog signala.

Vreme otpuštanja kao po pravilu traje znatno duže od vremena reakcije. Sa izuzetkom izraženih tranzijenata u zvuku, koji se javljaju s vremena na vreme, većina audio signala ima tendenciju da se izvesno vreme zadržava oko nivoa na koji se izdigla. Ovo zadržavanje traje barem po nekoliko ciklusa. Dakle, razumno je pretpostaviti da će signal koji se izdigne

iznad nivoa praga, iznad, ili oko praga ostati još neko vreme. Ako je već tako, nema svrhe dozvoliti da slabljenje nestane istog trenutka kada ulazni signal padne ispod praga, da bi već nekoliko milisekundi kasnije slabljenje opet bilo uspostavljano. Vreme otpuštanja se može shvatiti i kao vremenski interval u kojem funkcioniše neka vrsta memorije koja određeno vreme pamti nivo signala koji se procesira, i tokom kojeg se nivo slabljenja održava manje-više konstantnim. Na ovakav način se sklop kojim se reguliše vreme reakcije znatno manje koristi, čime se izbegavaju i svi potencijalni problemi i izobličenja koji nastaju usled same prirode prelaznih procesa punjenja i pražnjenja kondenzatora.

Kraća vremena otpuštanja podrazumevaju da elektronski sklop omogućuje preciznije praćenje anvelope originalnog signala, jer se potiskivanje isključuje vrlo brzo nakon pada signala ispod nivoa praga. Duža vremena reakcije obezbeđuju duži uticaj sklopa za potiskivanje na nivo signala.

Loše strane korišćenja dugačkog vremena otpuštanja dolaze do izražaja pre svega u situacijama u kojima tranzijent u signalu prekoračuje prag i time startuje nepotrebno slabljenje signala koji sledi u vremenu za tranzijentom, a po nivou se nalazi ispod praga. Time se može izgubiti dosta od primarne informacije tokom celokupnog trajanja vremena otpuštanja (sl. 52).



Slika 52: Efekat dugačkog vremena otpuštanja pri pojavi izraženog tranzijenta u signalu. Signal je nepotrebno potisnut nakon nailaska tranzijenta.

Subjektivni kompromis se u ovom slučaju vrši između izbora dužeg trajanja vremena otpuštanja, koje je u funkciji smanjenja opisanog izobličenja, s jedne strane, i bržeg prestanka slabljenja signala nakon pada ulaznog nivoa ispod nivoa praga, sa druge strane. Odluke po pitanju ovog kompromisa treba donositi u skladu sa konkretnim programskim materijalom koji se procesira.

Prekratko vreme otpuštanja, slično kao i u slučaju vremena reakcije, može dovesti do čujnih izobličenja, usled činjenice da se kolo za potiskivanje isuviše često uključuje i isključuje. Dobar primer za ovako nešto je česta pojava modulacije pozadinskih signala ili šumova dominantnom zvučnom energijom koja kontroliše uključivanje sklopa za potiskivanje. Ta modulacija se veoma često oseća kao neprirodno izdizanje i spuštanje nivoa određenog zvuka. U anglosaksonskoj literaturi se ova pojava označava kao *breathing* – disanje.

U zavisnosti od konkretnog programskog sadržaja koji se tretira sklopom za potiskivanje, isti uzrok može dovesti i do nešto drugačije izraženog problema. Naime, često se dešava da prekratko podešeno vreme otpuštanja dovodi do efekta neprirodnog izdizanja pozadinskog signala ili šuma, usled činjenice da dominantni signal koji prekoračuje nivo praga biva potiskivan. Uzmimo za primer situaciju u kojoj se procesira snimak akustične gitare: zbog kratkog vremena otpuštanja, potiskivanje prestaje neposredno nakon odsviranog tona, što za posledicu ima relativno izdizanje po nivou onih delova signala koji se nalaze ispod nivoa praga, kao što su škripanja žica, disanje, šum odeće i sl. Subjektivni efekat je, dakle, izdizanje nivoa pozadinskog šuma u snimku. Ovako izražen efekat se u anglosaksonskoj literaturi označava kao *pumping* – što bi trebalo da asocira na neprirodno pumpanje, tj. izdizanje nivoa pozadinskog šuma.

Nije zgoreg napomenuti da se usled činjenice da se dominantna zvučna energija najčešće nalazi u oblasti niskih frekvencija, često uspostavlja frekventna zavisnost gore opisanih efekata. To podrazumeva da nivo signala na srednjim i visokim frekvencijama direktno zavisi od načina na koji dominantni signali niskih frekvencija pobuđuju sklop za potiskivanje.

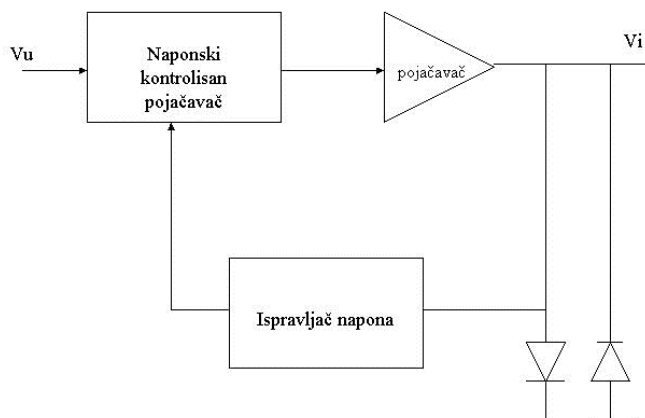
Sva ova izobličenja nastaju usled činjenice da dolazi do veoma brze promene pojačanja signala u vremenu, i nezavisna su od konkretnog primenjenog elektronskog rešenja. Ovako nastala izobličenja su, čak šta više, znatno izraženija od izobličenja koje u signal unosi sama elektronika. Izobličenja nastala usled korišćenog elektronskog sklopa mogu doći do izražaja samo ukoliko je signal niži po nivou od praga, te se dinamička obrada signala nikako ili retko vrši. Onog trenutka kada signal pređe preko praga, subjektivni kvalitet korišćenog sklopa je određen pre svega načinom na koji su vremena reakcije i uspostavljanja prilagođena konkretnom signalu.

Vreme otpuštanja se meri i izražava u milisekundama ili sekundama, a ponekad i nivoom opadanja u dB/mS ili dB/S.

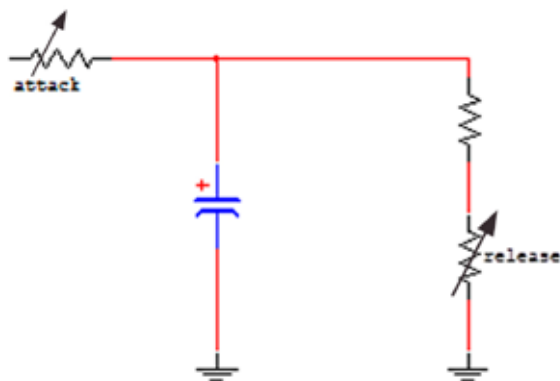
Kontrola vremena reakcije i otpuštanja. Složena vremenska konstanta.

Rešavanju opisanog problema u korišćenju dužeg vremena otpuštanja koji nastaje usled nailaska tranzijenata, može se pristupiti na dva načina. Ukoliko kvalitet zvuka nije primaran, već je neophodno imati pre svega efikasnu zaštitu od prekoračenja nivoa praga, kao što je npr. slučaj u AM radio prenosu, mogu se u kolu povratne sprege koristiti back-to-back diode, tj. sklop sa slike 53. Ovaj sistem obezbeđuje, kao što je već objašnjeno, efikasno zaustavljanje porasta nivoa signala iznad praga, bez naknadnog produžavanja vremena u kojem se slabi nivo signala koji je ispod praga limitovanja.

Kontrolu vremena reakcije i otpuštanja moguće je realizovati na način prikazan na slici 11. Između tačaka A i B u kolu sa slike 10, dodaje se sklop sa jednim kondenzatorom koji služi za pražnjenje otpornika čije vrednosti definišu trajanje vremena reakcije i otpuštanja.



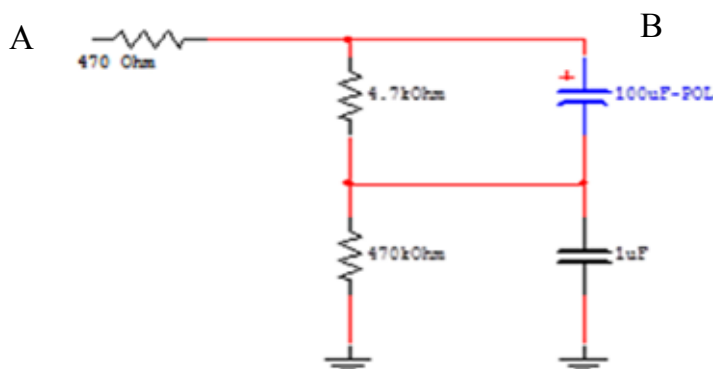
Slika 53: Limiter sa povratnom spregom bez mogućnosti regulisanja vremena reakcije i otpuštanja



Slika 54: Deo kola povratne sprege koji omogućava podešavanje vremena reakcije i uspostavljanja

Drugi, znatno suptilniji tip rešenja, je prikazan na slici 55. Umesto jednog zajedničkog kondenzatora i po jednog otpornika za definisanje vremena reakcije i otpuštanja, moguće je koristiti složenije kolo. Otpornik i kondenzator malih vrednosti čine dodatno kolo za formiranje kraćih vremena reakcije i otpuštanja, koje radi u saglasju sa kolom čije karakteristike omogućavaju formiranje dužih vremenskih konstanti. Na ovaj način se realizuje tzv. kolo sa složenim vremenskim konstantama (engl. *Compound Time Constants Circuit*).

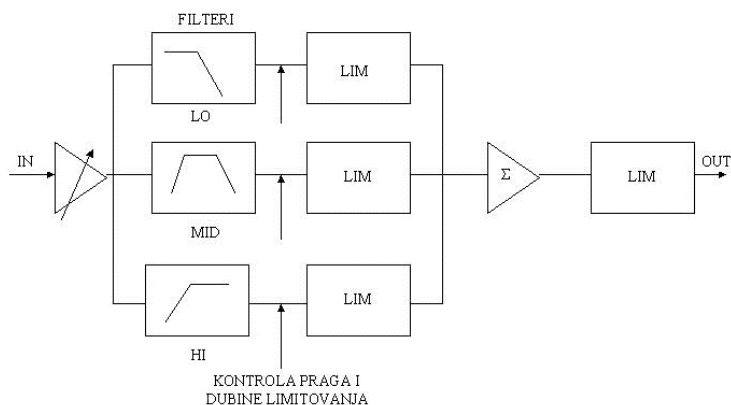
Logika koja se koristi pri projektovanju ovakvog sklopa je da dokle god signal zadržava relativno stabilne vrednosti, deo kola koji obezbeđuje duže vremenske konstante prati promene u nivou. Prilikom nailaska tranzijenata uključuje se deo kola sa kraćim vremenskim konstantama, koji obezbeđuje znatno bržu reakciju i srazmerno kraće vreme otpuštanja. Na ovakvom tipu kola, sa pažljivo isprojektovanim vrednostima korišćenih elemenata, se često zasnivaju sklopovi koji imaju mogućnost rada u tzv. „auto-modu”, koji ne omogućava manuelno podešavanje vremena reakcije i otpuštanja.



Slika 55: Deo kola povratne sprege sa mogućnošću formiranja dve različite vremenske konstante - kraće i duže

Obrada dinamike signala po frekvencijskim podopsezima

Složen, ali efikasan metod prevazilaženja problema frekvencijske zavisnosti optimalnih vremenskih konstanti je prikazan blok dijagramom na slici 56, na primeru jednog tropojasnog limitera. Ulazni signal se deli na više frekvencijskih podopsega (u ovom slučaju tri), nakon čega se svaki podopseg nezavisno podvrgava postupku limitovanja uz upotrebu vremenskih konstanti optimizovanih za procesirani opseg frekvencija: niži frekventni opsezi se tretiraju kolima sa dužim vremenskim konstantama, viši opsezi sa kraćim, čime se izbegavaju kompromisi u podešavanju vremenskih parametara kola, koji u krajnjoj instanci doprinose, kao što je već objašnjeno, izobličenju procesiranog signala.



Slika 56: Limitovanje signala po podopsezima

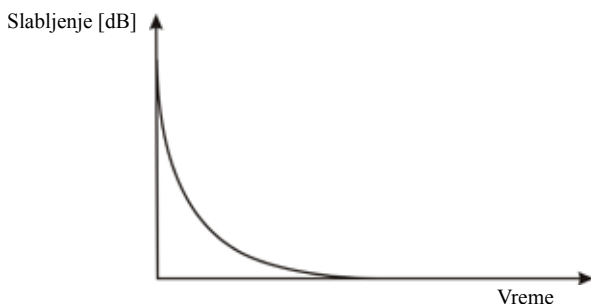
Signali iz svih podopsega se na izlazu iz sklopa sabiraju, nakon čega se signal vodi na limiter anvelope, koji vrši limitovanje na ovakav način dobijenog ukupnog signala. S obzirom da su podopsezi već prošli kroz proces limitovanja, može se zaključiti da ovaj finalni limiter anvelope vrši veoma blago procesiranje i usaglašavanje signala kao celine, ne utičući previše na konačan rezultat celog postupka limitovanja po podopsezima.

Ova tehnika dozvoljava mnogo preciznije procesiranje dinamike signala. Samom činjenicom da se niskofrekventni sadržaj tretira nezavisnim sklopom, izbegnuta je mogućnost pojave modulisanja srednje i visokofrekventnog sadržaja niskofrekventnim, na način opisan u prethodnom odeljku.

Aktivna konstanta vremena otpuštanja (*Active release time constant*)

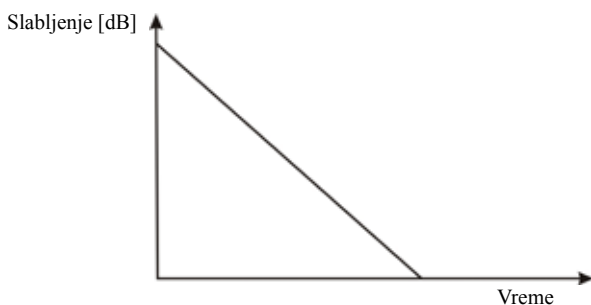
Pasivno pražnjenje kondenzatora u povratnoj sprezi preko otpornika nije uvek najbolje rešenje. U početnim trenucima procesa pasivnog pražnjenja kondenzator se znatno brže prazni nego u kasnijim fazama procesa. Kao posledica ovakve prirode procesa pražnjenja generiše se kontrolni napon koji na izlazu iz naponski kontrolisanog pojačavača prouzrokuje veoma brz oporavak početnog pojačanja u procesu otpuštanja, da bi kasnije u vremenu brzina oporavka bila znatno manja, kao što je prikazano na slici 57. Ovako velika strmina krive koja opisuje pražnjenje kondenzatora u vremenu je loša okolnost jer podrazumeva brzu početnu promenu pojačanja koja dovodi do izdizanja nivoa izobličenja i često zahteva produženje vremenskih konstanti kako bi se zadržao prihvatljiv nivo izobličenja, pre svega na niskim frekvencijama.

Ukoliko se isti kondenzator prazni upotrebom strujnog izvora konstantne struje, onda će i oporavak pojačanja u procesu otpuštanja biti linearan proces u vremenu (sl. 58), pri čemu treba imati u vidu da razmatrani naponski kontrolisani pojačivači koji se kontrolišu linearnim naponom na svom izlazu daju linearnu vremensku zavisnost karakteristike pojačanja izraženog u dB. Korišćenjem ovakvog ravnomernijeg načina pražnjenja kondenzatora, tj. ravnomernije promene pojačanja, moguće je skratiti vremena otpuštanja u odnosu na slučaj pasivnog pražnjenja kondenzatora, uz zadržavanje sličnih nivoa izobličenja niskofrekventnog sadržaja.



Slika 57: Vremenska zavisnost slabljenj za slučaj kada se koristi pasivno pražnjenje kondenzatora

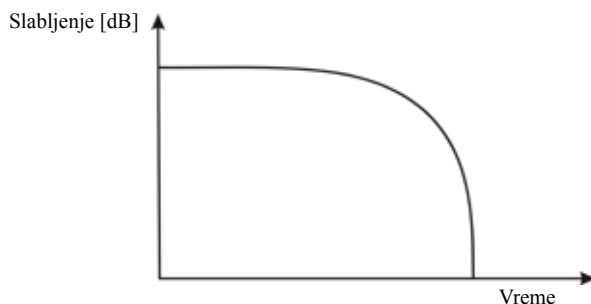
Pojedini naponski kontrolisani elementi sa logaritamskom (bipolarni tranzistori) ili kvadratnom (FET) zavisnošću od kontrolnog napona mogu se iskoristiti tako da uz upotrebu kola sa pasivnim pražnjenjem kondenzatora za generisanje kontrolnog napona daju na izlazu prilično dobru aproksimaciju linearne zavisnosti karakteristike pojačanja izražene u dB/S.



Slika 58: Vremenska zavisnost slabljenja kada se kondenzator prazni strujnim izvorom

Ukoliko se pražnjenje kondenzatora vrši preko strujnog generatora, upotrebom ovakvih nelinearnih naponski kontrolisanih elemenata može se dobiti karakteristika otpuštanja slabljenja koja je u početnim trenucima sporija (što za posledicu ima manje izobličenje niskofrekventnog sadržaja), da bi se sa vremenom početno pojačanje sve brže uspostavljalo. Ovakav tip kola omogućava uklanjanje nepotrebnog potiskivanja nivoa brže od svih do sada opisanih, uz zadržavanje sličnih nivoa izobličenja. Rezultat tretiranja programskog sadržaja

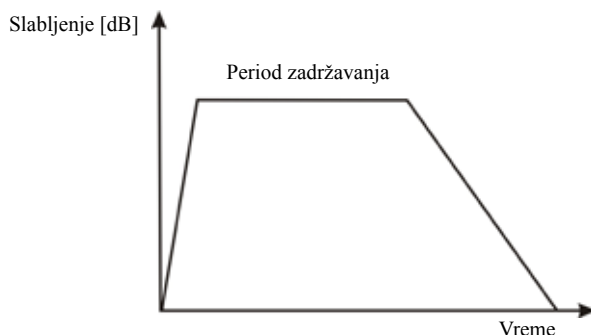
ovakvim tipom kola je veoma dobar, pri čemu se umanjuju ranije opisani neželjeni efekti, kao i posledice koje nastaju prilikom pojave izraženih tranzijenata u zvuku koji se procesira. Vremenska zavisnost ovog tipa slabljenja je prikazana na slici 59.



Slika 59: Vremenska zavisnost slabljenja za slučaj pražnjenja strujnim izvorom konstantne struje, uz korišćenje nelinearnih naponski kontrolisanih elemenata.

Vreme zadržavanja

Ukoliko se pražnjenje kondenzatora vrši preko strujnog generatora koji je moguće na neki način kontrolisati, proces pražnjenja se u svakom trenutku može prekinuti. Na taj način se napon na kondenzatoru zadržava na zatečenom nivou, što za posledicu ima zadržavanje nivoa slabljenja kola na nivou zatečenom u trenutku isključenja strujnog generatora.



Slika 60: Karakteristika slabljenja sa namerno unešenim periodom zadržavanja

Dizajn naprednijih uređaja za obradu dinamike signala omogućava da se istog trenutka kada signal pređe nivo praga isključi strujni generator koji prazni kondenzator. Nakon pada nivoa signala ispod nivoa praga, za razliku od klasičnih sistema gde proces otpuštanja počinje automatski istog trenutka, strujni generator ostaje isključen još neko vreme (engl. *hold* ili *hang time*), čime se nivo potiskivanja održava konstantnim. Nakon isteka tog vremena, strujni generator se uključuje, i proces pražnjenja kondenzatora, tj. proces otpuštanja se nastavlja uobičajenim tokom (sl. 60).

Prednosti ovog sistema leže u činjenici da tokom vremena zadržavanja ne dolazi do opisanih izobličenja koja su posledica postojanja vremenskih konstanti kola za otpuštanje, kao i da je moguća potpuna kontrola procesa otpuštanja, tj. stope oporavka pojačanja proizvoljnom brzinom nakon proizvoljnog trenutka u vremenu.

Vreme zadržavanja se direktno izražava u mS ili S.

4.4 Uređaji za proširivanje opsega dinamike

U dosadašnjem tekstu smo se bavili osnovnim principima na kojima se zasniva rad uređaja koji služe za smanjivanje dinamičkog opsega signala. Suština je u tome da oni vrše potiskivanje signala koji prelazi određeni, unapred zadati nivo praga.

Uređaji koji proširuju dinamički opseg signala rade na veoma sličnom principu: takođe potiskuju signal, ali tek u situaciji kada on po nivou padne ispod nekog unapred zadatog nivoa praga. Dakle, svi pojmovi i principi opisani u dosadašnjem delu teksta apsolutno važe i za elektronske sklopove koji proširuju dinamički opseg. Iz tog razloga ćemo u nastavku teksta ukazati samo na neke specifičnosti u njihovom dizajnu i upotrebi.

4.4.1 Propusnik signala

Možda i najčešća upotreba ove vrste procesiranja u praksi je u svrhe sprečavanja propuštanja signala u dalji tok audio sistema ukoliko po nivou ne prekoračuje nivo unapred zadatog praga. Veoma često to podrazumeva da u procesu rada sa višekanalnim sistemima kanali u kojima trenutno nema korisnog signala bivaju automatski isključeni iz ukupnog signala, čime se izbegava njihov doprinos sveukupnom šumu. Ovakva funkcija popusnika signala pogotovo dolazi do izražaja u svrhe zaštite i unapređenja audio sistema namenjenih za potrebe ozvučavanja, gde se propusnik koristi za automatsko isključivanje toka mikrofonskog signala kada signal padne ispod vrednosti prethodno definisanog praga. Na taj način se može vršiti smanjivanje broja »otvorenih« mikrofona na pozornici u skladu izvođenim sadržajem, što umnogome može umanjiti opasnost od pojave akustičke povratne sprege.

Prilikom snimanja zvuka u višekanalnoj tehnici, uz korišćenje više mikrofona istovremeno, propusnikom signala je moguće izvršiti procesiranje kojim se u signalu zadržava

samo dominantni signal izvora za čije je snimanje konkretni mikrofonski kanal direktno zadužen, dok se signali ostalih izvora iz neposrednog akustičkog okruženja potiskuju.

Uređaj koji vrši ovakvu regulaciju toka signala se u anglosaksonskoj literaturi, kao što smo već napomenuli, označava kao *gate* – kapija. Izražena asocijativnost ovog jezika nam ovog puta predložava sliku obične kapije, koja će se otvoriti samo ukoliko je signal dovoljno jako „gurne”.

Klasična upotreba propusnika podrazumeva potpuno potiskivanje signala ispod praga, ali u praksi se koriste i niži nivoi potiskivanja. Povremeno potpuno isključivanje i uključivanje pojedinih kanala može biti osetno i nepotrebno čujno u ukupnom zvuku, tako da se izbegava. Nivo slabljenja signala se podešava pomoću parametra koji na komercijalnim uređajima najčešće nosi oznaku *Depth* ili *Attenuation*. Niži nivoi zahtevanog potiskivanja takođe omogućavaju niže nivoe izobličenja, u odnosu na zahtev da se signal ispod praga potpuno potisne. Uređaj koji omogućava podešavanje nivoa potiskivanja se u anglosaksonskoj literaturi označava kao *Expander*.

Parametar vremena reakcije (*attack time* se na nekim uređajima ovog tipa označava kao *wake-up time*) određuje brzinu kojom propusnik vrši propuštanje izlaznog signala nakon što ulazni signal prekorači nivo praga. Pri tome ne treba smetnuti sa uma da vreme reakcije kod ovih uređaja podrazumeva vreme potrebno da se proces potiskivanja signala zaustavi, dok kod uređaja za smanjivanje dinamičkog opsega ono označava upravo obrnuto: vreme potrebno da se proces potiskivanja uspostavi.

Vreme zadržavanja je parametar koji određuje koliko dugo nakon pada nivoa ulaznog signala ispod nivoa praga izlazni signal ostaje prisutan, dok je vreme otpuštanja u ovom slučaju ono vreme koje je potrebno da se uspostavi zahtevano slabljenje.

Podešavanje parametara pre svega treba da omogući unošenje što manjih smetnji i izobličenja u tretirani signal. U tom smislu ovi parametri variraju od veoma kratkih vremena reakcije i otpuštanja za rad sa izrazito tranzijentnim signalima, do dužih vrednosti istih parametara koji se koriste u postupcima redukcije šuma.

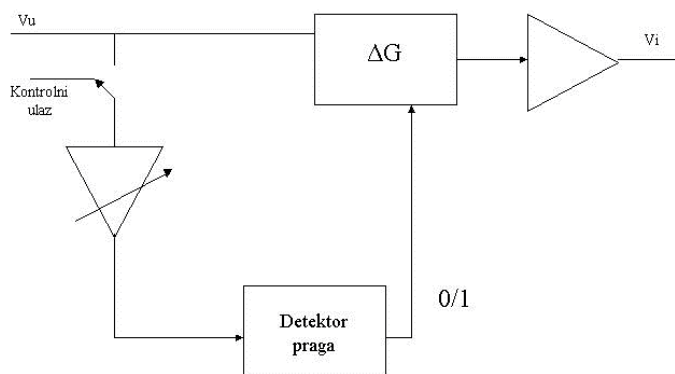
Opsezi korišćenih vremenskih konstanti su slični onima koje se koriste kod uređaja za smanjivanje dinamičkog opsega. Nivo praga, pak, u praksi ima mnogo veći radni opseg i može se kretati od relativno visokih nivoa (čak i oko +20 dBu za pojedine namene) pa sve do ispod -40 dBu. Viši nivoi praga se često koriste za potrebe generisanja kontrolnih signala (engl. *key triggering*), dok se prag u praksi postavlja na niže nivoe pre svega u svrhe

potiskivanja šuma i neželjenih signala. Prilikom upotrebe propusnika u svrhe automatsko isključivanja kanala u kojima koristan signal padne ispod određenog praga potrebno je veoma pažljivo postaviti prag na nivo koji se u svakom trenutku nalazi ispod nivoa korisnog signala. Ukoliko taj uslov nije zadovoljen, doći će do odsecanja delova korisnog signala ispod praga. U radu sa uobičajenim signalima vrednosti praga od oko -10 do -20 dBu se mogu smatrati standardnim. Nivoi slabljenja se najčešće mogu podešavati u opsegu od 0dB do oko 40 dB.

4.4.2 Principi realizacije

Kod uređaja za smanjivanje dinamičkog opsega signala se sve vreme vrši poređenje nivoa signala na izlazu iz naponski kontrolisanog pojačavača sa nivoom praga. Kod uređaja koji vrše potiskivanje signala ispod nivoa zadatog praga se mora omogućiti poređenje nivoa signala na ulazu u kolo sa nivoom praga. Principsko rešenje predstavljeno blok šemom na slici 61 se u anglosaksonskoj literaturi označava kao *feed-forward sidechain* tip kola i predstavlja danas najčešće korišćeni metod generisanja kontrolnog signala za potrebe potiskivanja nivoa signala ispod nivoa praga.

Ovo rešenje podrazumeva da se ulazni signal paralelno vodi u naponski kontrolisan oslabljivač ΔG i pojačavač promenljivog pojačanja. Promenom pojačanja tog pojačavača se reguliše nivo praga. Iza ovog pojačavača se nalazi detektor praga, koji predstavlja komparator tipa 0/1, i koji vrednost izlaza menja prilikom prelaska signala na svom ulazu preko nivoa praga. Na taj način je omogućeno nesmetano praćenje promena ulaznog signala i, u skladu sa tim, regulisanje slabljenja izlaznog signala. Nivo potiskivanja se reguliše kontrolom oslabljivača ΔG .

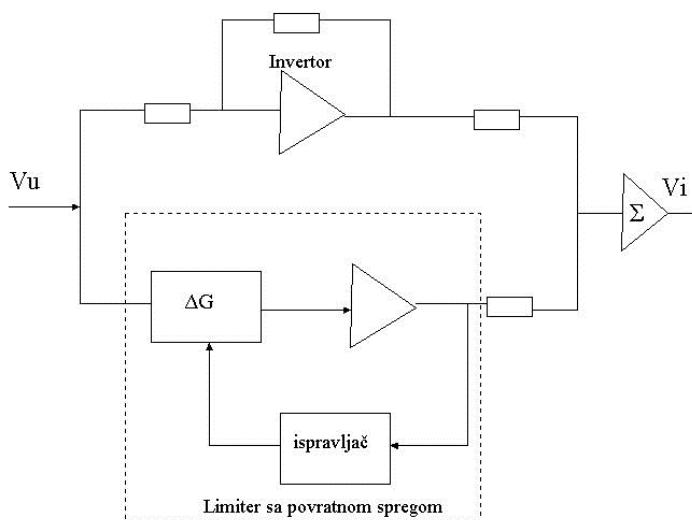


Slika 61: Blok šema povratne sprege tipa *feed forward sidechain* tipa

Kontrola detektora praga se može vršiti i preko kontrolnog ulaza (engl. key input) na koji se dovodi potpuno nezavisan kontrolni signal. Ovakav način korišćenja propusnika se može sresti u pokušajima da se simuliraju zvuci nekih perkusivnih instrumenata pomoću, najčešće, belog šuma. Naime, udarci u instrument služe za „otvaranje kapije”, tj. za definisanje vremenskih intervala u kojima je šum prisutan na izlazu iz sklopa. Filtriranjem šuma, uz adekvatno podešavanje parametara procesa, na ovaj način je moguće generisati veoma zanimljive zvuke. Poznati su primeri iz prakse da su čak i brumovi iz napajanja vođeni na obradu na ovaj način, sa krajnjim rezultatom koji predstavlja zanimljiv zvuk sličan timpanima ili bas bubnju.

Subtractive Feedback Gate

Na blok šemi na slici 62 se može uočiti da se ulazni signal paralelno vodi kroz klasično kolo za limitovanje sa povratnom spregom (donji put), i kroz obrtač faze (gornji put). Ukoliko se signal nalazi ispod nivoa praga definisanog parametrima kola za limitovanje, na izlaznom sabiraču dolazi do potpunog faznog poništavanja signala iz gornjeg i donjeg toka, tj. izlazni nivo signala je nula. Kada signal u donjoj grani pređe unapred zadati prag limitera, ostaje na konstantnom nivou, dok nivo signala u gornjoj grani kola nastavlja neometano da raste, što za posledicu ima pojavu signala na izlazu iz sabirača. Vremenske konstante kola i nivo praga su definisani karakteristikama korišćenog kola za limitovanje, dok se količina slabljenja signala definiše stepenom razdešenosti limitovanog i nelineitovanog dela signala koji se pojavljuju na ulazu u izlazni sabirač. Ovaj tip kola se u anglosaksonskoj literaturi označava kao *Subtractive Feedback Gate*.



Slika 62: Blok šema realizacije propusnika signala korišćenjem limitera sa povratnom spregom

Ekspander

Ekspanderi proširuju dinamički opseg izlaznog signala u odnosu na ulazni u skladu sa odnosom ekspanzije. Odnos ekspanzije od 1:3 proširuje dinamički opseg tri puta, ulaznog signala od npr. 4 dB na 12 dB na izlazu.

Ekspanderi koji rade u celokupnom dinamičkom opsegu se retko sreću. Na jčešće se takav mod rada sreće u komplementarnom radu sa kompresorima punog opsega, koji se koriste u sistemima za redukciju šuma. U takvim primenama se kao po pravilu koristi odnos 1:2.

Ekspanderi koji se koriste u praksi imaju parametar prag ekspanzije. Iznad praga ekspanzije, signal ostaje nepromenjen, dok se ispod praga uspostavlja određeni nivo redukcije signala. Ovakav mod rada prilično liči na princip rada gejta. I zaista, gejt se može predstaviti kao ekspander sa odnosom $1: \infty$. Upotreba ekspandera je slična kao i za gejt, samo što je moguće vršiti finija podešavanja. Relativno blagi odnosi ekspanzije (1:2, 1:3) mogu omogućiti isti nivo redukcije šuma kao i gejt, ali sa manje uticaja na originalni signal. Signal je utišan, ali i dalje čujan ispod praga, dok iznad praga nema naglog pojavljivanja signala, već samo njegovog pojačanja. Vreme reakcije je moguće držati dužim, što za posledicu ima manji uticaj procesiranja na kvalitet signala. Vremenske konstante side chain petlje ekspandera su slične kao i kod gejta, što važi i za opseg praga koji je moguće podešavati. Ekspanzija se koristi kao suptilnija zamena za gejt, u istoj meri u kojoj se kompresija koristi kao nežnija zamena za limitovanje.

Upotreba uređaja za smanjivanje opsega dinamike signala

Verovatno najčešća upotreba uređaja za smanjivanje dinamičkog opsega signala u praksi je, kako je već napomenuto, u svrhe preventivne zaštite audio sistema od eventualnih preopterećenja nivoom signala. Kada je jasno definisan headroom korišćenog audio sistema, često je neophodno ograničiti dinamički opseg programskog materijala. To je pogotovo slučaj pri emitovanju audio signala. Veliki i nekontrolisani dinamički opseg emitovanog materijala realno može dovesti do problema: sa jedne strane postoji opasnost od preopterećenja sistema nivoom signala, dok se sa druge strane, tihi delovi programskog materijala lako mogu na prijemnoj strani utopiti u ambijentalnu buku ili statičke i interferencione smetnje. Upotrebom limitera se vrši svođenje dinamičkog opsega na prihvatljive nivoe, koji omogućavaju da se emitovani program nesmetano prati čak i u izrazito bučnim sredinama, poput automobila, radionica itd. Redukcijom dinamičkog opsega signala se postiže da se tiši delovi mogu

reprodukovati nivoom potrebnim za nesmetano praćenje programskog materijala, a da istovremeno glasniji delovi ne izlaze iz dinamičkog opsega definisanog headroom-om sistema.

U kreativnom smislu limiter svoju ulogu nalazi u situacijama kada je određeni programski sadržaj potrebno učiniti što glasnijim. Subjektivni osećaj prilikom slušanja emitovanog programa je da glasniji delovi programskog sadržaja »bolje« zvuče. To je razlog zbog kojeg se ponekad prave posebne verzije zvučnih zapisa za potrebe emitovanja, u kojima je programski sadržaj prethodno pažljivo istretiran limiterom. Nije neobično da se pri emitovanju vrši limitovanje signala od praga koji se nalazi i po 15 do 20 dB ispod granice određene headroom-om sistema.

Uobičajeni audio signali podrazumevaju postojanje izraženih tranzijenata i pikova koji se po nivou nalaze iznad prosečnog za dati sadržaj. Ukoliko se ovi pikovi uklone iz signala, prosečan emitovani nivo se u skladu sa tim može izdići. Uklanjanje pikova je efikasnije ukoliko je kraća vremenska konstanta sklopa koji na pikove reaguje i to uklanjanje vrši, što za posledicu ima mogućnost efikasnijeg izdizanja ukupnog sadržaja po nivou. Treba imati na umu da ovakvi postupci, ukoliko im se ne pristupi izuzetno pažljivo, uvek za posledicu imaju umanjenje originalnog kvaliteta tretiranog signala.

Zanimljiv psihoakustički efekat koji treba imati u vidu prilikom upotrebe uređaja za smanjivanje opsega dinamike signala je da uvo zvuke za koje na osnovu iskustva »zna« da treba da budu »glasni« zaista i oseća kao glasnije u odnosu na zvuke za koje »zna« da su uobičajenijih nivoa, čak i ako su limitovanjem oba zvuka dovedena na isti nivo. Ukoliko imamo na umu činjenicu da se prostori koji imaju nivo reverberacionog zvuka bliže nivou direktnog zvuka subjektivno doživljavaju kao glasniji, možemo zaključiti da približavanje nivoa reverberacione i direktne komponente zvuka upotrebom limitera dovodi do efekta da čitav zvuk ostavlja utisak veće glasnoće.

Kompresija je postupak obrade signala koja ima za cilj da porast nivoa signala na izlazu iz kompresora smanji u odnosu na porast nivoa signala na ulazu u kompresor, za iznos definisan parametrom stepen kompresije. Liči na limiter, radi kao limiter... Osnovna razlika je u praktičnoj primeni. Kompresori se najčešće koriste sa umerenijim odnosima kompresije za regulisanje dinamičkog opsega signala, što za posledicu ima da procesirani signal ima očuvan, mada umanjen, odnos tiših i glasnijih delova programskog materijala. Upotrebom kompresora se može uticati i na boju procesiranog zvuka. Određeni stepen kompresije može da dovede do akcentovanja niskofrekventnog sadržaja, koji je energetski dominantan u prosečnom audio signalu, te kao takav kontroliše proces komprimovanja.

Teoretski, kompresor može da utiče na sve signale na isti način, nevezano od njihovog nivoa. Bez obzira da li je ulazni nivo signala +20 dBu ili -60 dBu, nivo promene ulaznog nivoa se pojavljuje, umanjen stepenom kompresije, na izlazu. U praksi se kompresori ne koriste za rad sa ovalikim opsezima ulaznih signala. To je pogotovo slučaj za niske nivoe signala, osim za neke specijalne namene (u sistemima za redukciju šuma u telefonskim linijama, magnetnim snimačima i sl.), gde se koriste sa komplementernim ekspanderima za restauraciju originalnog dinamičkog opsega nakon sprovedene redukcije šuma.

Većina kompresora ima mogućnost podešavanja praga kompresije, tj. onog nivoa ulaznog signala ispod kojeg se ne vrši njegovo smanjivanje po nivou (odnos kompresije 1:1). Iznad praga se vrši kompresija definisanim stepenom, na način sličan načinu na koji radi limiter. Sličnosti u radu limitera i kompresora posebno dolaze do izražaja kada kompresor radi sa velikim odnosima kompresije. Odnos kompresije od 10:1 smanjuje porast nivoa na ulazu od 10 dB na 1 dB porasta nivoa na izlazu.

Vremenske konstante povratnih sprega koje se koriste pri projektovanju kompresora su veoma slične vremenskim konstantama koje se u praksi koriste kod limitera. Vrednosti praga koje se koriste u praksi su nešto niže nego pri radu sa limiterima i kreću se od oko -30dBu do +10dBu. Podešavanje odnosa kompresije je najčešće omogućeno u punom opsegu, od 1:1 do ∞ :1, što je teoretska granica, koja u praksi praktično predstavlja limitovanje signala.

Na pojedinim komercijalnim spravama se sreću odnosi kompresije koji nakon odnosa ∞ :1 dobijaju negativne vrednosti. To je opseg rada uređaja u kojem se sign kojem se nivo izdiže iznad praga kontinuirano slabi sa izdizanjem. Ovakav mod rada omogućava projektovanje znatno dužih vremena reakcije.

4.5 Primeri upotrebe gejta i kompresora u muzičkoj produkciji

Gejt je, kao što je već objašnjeno, uređaj za procesiranje dinamike koji je prilično „surov“ u tretiranju signala, u tom smislu da zvuk na njegovom izlazu ili postoji ili ne postoji. Ovakva karakteristika gejta čini da njegova upotreba u svrhu muzičke produkcije nije preterano česta, ali daleko od toga da nema svoju primenu. Neke od tih primena su razmotrene u nastavku teksta.

Za dobar primer upotrebe gejta u fazi miksa može poslužiti rad sa snimkom bubnja. Bubanj je instrument koji se veoma često snima upotrebom više mikrofona, od kojih barem po jedan snima svaki od elemenata ponaosob. U takvim situacijama je nemonovno da u fazi miksa dođe do pojave preslušavanja između kanala, u tom smislu da se u svim snimljenim kanalima mogu čuti zvuci svih elemenata bubnja. Ovo samo po sebi nije nikakva greška niti nepoželjna pojava, već jednostavno logična posledica takvog pristupa snimanju bubnja. Ponekad je od interesa da se tako usnimljeni kanali „očiste“ od zvukova kojima nisu prvobitno bili namenjeni, tj. da se u datom kanalu čuje samo zvuk onog elementa koji je bio predviđen da se u njemu snimi. Ovakva potreba svoje opravdanje ima u činjenici da bilo kakve intervencije koje se vrše u tom kanalu neće uticati samo na element koji je u njemu dominantan (npr. bas bubanj), već i na zvuke elemenata koji se u njemu takođe čuju (npr. doboš), što može dovesti do određenih problema i neželjenih kompromisa u fazi miksa. Ovaj zadatak se može realizovati upotrebom gejta, čiji se prag postavlja tako da propušta dominantan zvuk u kanalu, dok manje dominantni zvuci ostaju ispod praga, te na taj način ne učestvuju u daljem toku rada na miks.

S obzirom na činjenicu da ritam sviranja bubnja često podrazumeva brzu smenu zvukova njegovih pojedinačnih elemenata, u ovakvim postupcima potrebno je vreme otpuštanja postaviti na kratko trajanje, kako bi se sprečilo da se nepoželjan zvuk „provuče“ kroz kapiju koju je pre toga otvorio dominantan zvuk. Sa druge strane, ukoliko je vreme otpuštanja prekratko, veoma lako može doći do odsecanja „repa“ zvuka koji se želi propustiti, čime se bitno i najčešće negativno utiče na karakter zvuka čiji se kanal trenutno procesira. Ovakva situacija je relativno česta, pogotovo kod instrumenata koji imaju izraženo trajanje tona nakon početnog tranzijenta, poput klavira, činela i sl. Ukoliko do toga dođe, neophodno je vreme otpuštanja podesiti na duže vrednosti, ali tako da nepoželjni zvuci ipak ostanu odstranjeni. U ovom podešavanju vremena otpuštanja često se mora doći do neke vrste kompromisa između potrebe da se zadrži prirodnost zvuka željenog i odstrani prisustvo neželjenog zvuka u kanalu. Nije retka situacija da je ovaj kompromis i nemoguće postići na zadovoljavajuć način, pa se od postupka gejtovanja odustaje. Da bi se ovakve situacije predupredile, ukoliko je producent

svestan da će želeti da izvrši čišćenje kanala gejtom u fazi pripreme miksa, neophodno je u fazi snimanja mikrofona postaviti tako da maksimalno potiskuju zvuke neželjenih instrumenata koji sviraju u istom prostoru.

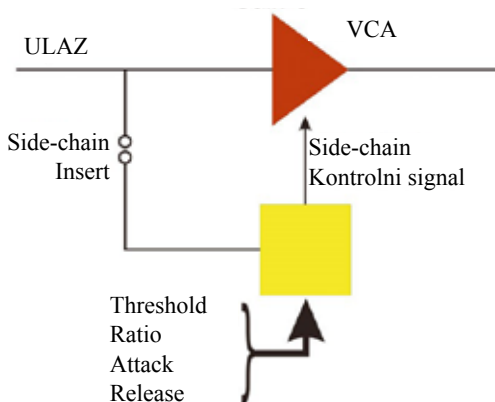
Postoje situacije kada se gejt koristi upravo sa namerom da skрати nepoželjno dugo trajanje tona snimljenog instrumenta, poput bas bubnja, doboša, timpana ili sl. Ovo predugo trajanje se ponekad manifestuje kao krajnje nepoželjna pojave rezonantne zvonjave snimljenog instrumenta, koja svojim tonalnim karakterom smeta u fazi miksa. U tim situacijama prag gejta se postavlja tako da propušta inicijalni udarac, a vremenom otpuštanja se podešava dužina trajanja zvuka koji će biti propušten, na taj način da se neželjno dugo trajanje zvuka svodi na prihvatljiv nivo. Pojavu nepoželjne zvonjave je naravno bolje sprečiti u fazi snimanja, ili drugačijim pozicioniranjem ili izborom mikrofona, ili dodatnim „otežavanjem“ membrane perkusivnog instrumenta. (Česte su situacije u snimateljskoj praksi kada se na „kože“ pojedinih elemenata bubnja lepe papirne maramice, salвете i slične stvari, koje treba da spreče preterano oscilovanje membrane nakon inicijalnog udarca u nju.)

Istu tehniku treba imati na umu i kao korisnu kada se iz snimka želi eliminisati prisustvo reverberacije prostorije: u ovom slučaju se zvučanje prostora može smatrati repom zvuka instrumenta, koji se po potrebi može skraćivati upotrebom gejt procesora: izuzetno kratka vremena otpuštanja će praktično potpuno eliminisati zvuk snimljene reverberacije, dok se njegovim produžavanjem ovaj aspekt zvuka može dozirati u skladu sa trenutnim potrebama.

Većina današnjih uređaja za obradu dinamike signala poseduje posebno dizajniran ulaz koji se označava imenom Sidechain Insert. Ovakvo ime treba da označi situaciju u kojoj se signal koji se dovodi na taj ulaz u procesor koristi za kontrolu otvaranja kapije (gejta), kroz koju i dalje prolazi (ili ne prolazi) signal koji je na ulazu. Dakle, kontrolu otvaranja gejta ima signal na ovom „sporednom“ ulazu u spravu: onog trenutka kada se na Sidechain ulazu pojavi signal, raskida se veza između ulaznog signala i kola za detekciju, i signal sa Sidechain ulaza počinje da diktira rad tog kola (slika 63).

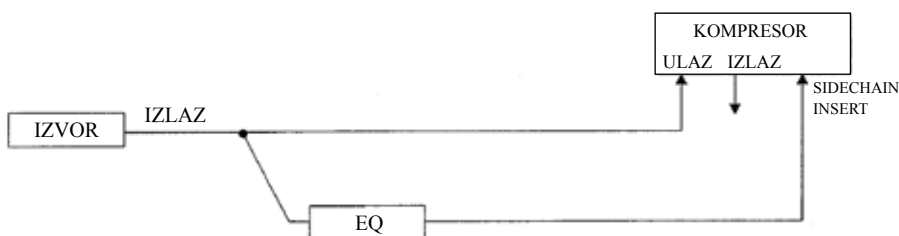
Ovakva mogućnost otvara zanimljive kreativne mogućnosti, poput postizanja savršene sinhronizacije u sviranju pojedinih instrumenata, naglašavanja ritma i dinamike ili popravljavanja dinamički nedorečenih ritmičkih struktura. Razmotrimo sledeći, verovatno najčešće korišćen, primer upotrebe ove opcije u radu sa gejtom: snimak bas gitare se dovodi na ulaz gejta, dok se istovremeno snimak bas bubnja dovodi na Sidechain ulaz, pri čemu se prag postavlja tako da se gejt otvara samo u trenucima kada dođe do udarca bas bubnja. Ova postavka dovodi do toga da zvuk bas gitare prolazi na izlaz gejta samo u trenucima kada dođe do udarca bas bubnja – pre i posle udarca, bas gitara se jednostavno nečuje, čak i ako je

ima u snimku, jer gejt nije otvoren. Na ovaj način se postiže praktično savršeno vremensko poklapanje zvukova bas bubnja i bas gitare, što, sa jedne strane nije lako postići sviranjem, a, sa druge strane, jeste česta potreba u određenim muzičkim žanrovima. Česta je i situacija u kojoj se signal bas bubnja na Sidechain ulazu koristi da na izlaz gejta propušta zvuk nekog oscilatora. S obzirom na savršeno vremensko poklapanje zvuka bas bubnja i oscilatora, dobija se mogućnost kombinovanja u svrhe postizanja specifičnog zvuka koji se želi postići.



Slika 63: Blok šema realizacije propusnika signala korišćenjem limitera sa povratnom spregom

Još jedna korisna primena Sidechain opcije u radu sa gejtom je tzv. frekvencijski zavisno gejtovanje. U primeru sa početka ovog dela teksta, u kojem smo razmatrali upotrebu gejta u svrhe „čišćenja“ kanala npr. bas bubnja od zvuka doboša, rekli smo da je jako teško podesiti prag gejtovanja tako da ne dolazi do tzv. lažnog okidanja, kada gejt otvara udarac u doboš. Da bi se ova pojava dodatno predupredila, moguće je na Sidechain ulaz dovesti signal bas bubnja koji je prethodno poslat u ekvilajzer, gde je izvršena obrada zvuka na taj način da je frekvencijski maksimalno odsečen svaki zvuk osim zvuka bas bubnja, koji je dodatno naglašen. Na taj način će gejtovanje u svrhe čišćenje kanala biti kontrolisano prethodno namenski isfiltriranim signalom, tako da samo željeni signal (u ovom slučaju bas bubanj) kontroliše kolo za detekciju, čime će gejt postati dodatno selektivan za otvaranje samo u onim trenucima kada nastupi udarac bas bubnja, što jeste bio početni cilj. Principijska blok šema realizacije ovako opisanog načina rada prikazana je na slici 64.



Slika 64: Principijska blok šema realizacije postupka frekvencijski zavisne kompresije

4.5.1 Pojedini aspekti primene kompresora

Česta je pojava da se u radu sreću snimci na kojima dolazi do varijacije nivoa usnimljenog signala. Tipičan primer za ovako nešto je situacija u kojoj pevač ili instrumentalista menjaju rastojanje od mikrofona tokom trajanja snimanja. Takođe nije retka situacija da različiti tonovi na nekim instrumentima variraju po nivou koji generišu na snimku, ili da sam izvođač nema dobru kontrolu dinamike kojom svira svoj instrument. U svim ovim situacijama se kompresor koristi kako bi se izvršila nivelacija nivoa problematičnih deonica snimka. U te svrhe se parametar ratio – odnos kompresije, postavlja na vrednosti koje, u zavisnosti od konkretne situacije, mogu varirati od malih odnosa kompresije 2:1, 3:1 do relativno velikih odnosa poput 10:1, sve u zavisnosti od konkretne situacije i potreba. Podešavanje praga kompresije se obavlja uz pomoć vizuelne kontrole koju poseduju praktično svi uređaji za kontrolu dinamike koja je označena kao gain reduction. Standardan prikaz ove kontrole je preko niza lampica čije paljenje označava kada i koliko se potiskuje procesirani signal, izraženo u decibelima. Kombinovanjem ove vizuelne kontrole i pažljivim slušanjem rezultata sprovedene kompresije moguće je fino podešavanje praga kompresije. Podešavanje praga će definisati vremenske trenutke u kojima se gain reduction kontrola aktivira (trenutak paljenja lampica), dok se konkretan nivo potiskivanja signala (broj upaljenih lampica) reguliše podešavanjem ratio parametra.

Sličan način tretiranja kompresora je čest i u samom procesu usnimavanja, čime se sprečava da dođe do neželjenog izobličenja ili distorzije snimljenog signala. U takvim situacijama se prag kompresije postavlja tako da usnimavani instrument sviran prosečnom dinamikom koju određena numera podrazumeva ne pobuđuje redukciju signala, dok povremene glasnije deonice bivaju potisnute za iznos potreban da se uređaj za snimanje zaštiti od preopterećenja. Ova procedura je pogotovo korisna kada se obavlja snimanje numere ili deonice nepoznatog sadržaja i karaktera dinamike, u kojima nije moguće predvideti najviši nivo signala koji će se pri snimanju pojaviti.

Upotreba kompresora u svrhe sprečavanja izobličenja snimka može biti tako realizovana da se spreči da do izobličenja dođe samo u kritičnom regionu frekvencija. Dobar primer za takvu situaciju je snimanje overhead mikrofona na bubnju, kada lako može doći do neželjene distorzije snimka samo pri jačim udarcima u činele (koje bi zbog toga trebalo kompresovati), dok blaži udarci u činele ili udarci u timpane ne izazivaju nikakav problem (te ih shodno tome nema potrebe kompresovati). U tim situacijama se koristi tehnika frekvencijski zavisne kompresije (već opisana na primeru gejtja), koja podrazumeva da se signal iz overhead mikrofona istovremeno vodi i na ulaz kompresora i u ekvilajzer. U ekvilajzeru se vrši obrada koja za cilj ima da istakne opseg frekvencija na koji želimo da utičemo kompresijom (npr. 5

kHZ u primeru sa činelama), nakon čega se tako obrađen signal dovodi na Sidechain insert ulaz kompresora. Na ovaj način se obezbeđuje da proces kompresije nije iniciran udarcem u timpane ili slabijim udarcima u činele, već samo u trenucima jakih pobuda u visokim frekvencijama, što jeste bio prvobitni cilj.

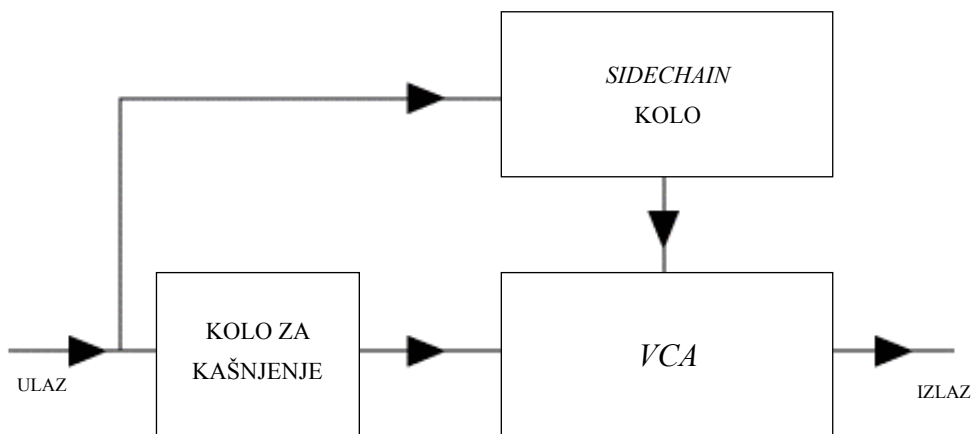
Ovakva frekvencijski zavisna kompresija predstavlja dakle mogućnost da se u signalu potisnu samo određeni frekvencijski regioni, što može biti iskorišćeno u situacijama kada je od interesa da se u snimku istaknu određene komponente, koje ostaju nepotisnute. Jednostavnije rečeno, one frekvencije koje se na ekvilajzeru u sidechain petlji izdižu bivaju maksimalno potisnute u glavnom toku audio signala. Ovde nikako ne treba smetnuti sa uma da onog trenutka kada do kompresije dođe, ceo signal biva zahvaćen, a ne samo one njegove komponente koje su prekoračile nivo, što jeste suštinska razlika u odnosu na Multiband kompresiju kod koje se vrši komprimovanje samo unapred određenog opsega frekvencija, na koju ovakav postupak može naizgled da liči.

Nije naodmet napomenuti da ista tehnika može biti korišćena i na taj način da se frekvencijski regioni signala koji žele biti istaknuti potiskuju u ekvilajzeru, što dovodi do toga da bivaju manje zahvaćeni kompresijom, odnosno do njihovog dodatnog isticanja u odnosu na delove spektra koji nisu potisnuti ekvilizacijom, te samim tim češće prekoračuju prag i bivaju komprimovani.

Na istovetan način kompresor može biti iskorišćen za potrebe obavljanja „*de-essing*“ funkcije (potiskivanje prenaplašenih sibilanata u vokalu). Potrebno je samo na ekvilajzeru u sporednoj petlji istaći frekvencijski region u kojem sibilanti dominiraju (5-8 kHz), nakon čega će nastupi preterane energije vokala u tom regionu biti potisnuti, što i jeste cilj de-essing tehnike. De-eseri su namenski uređaji koji se kao po pravilu svrstavaju u uređaje za ekvilizaciju signala, ali suštinski jesu upravo frekvencijski zavisni kompresori. Njihova uloga nije da obavljaju kompresiju vokala, već samo da potiskuju prenaplašene sibilante. Iako stoji činjenica da u trenutku kada dođe do prekoračenja praga kompresije čitav procesirani signal biva komprimovan, setovanjem vremenskih parametara kompresije na kratke vrednosti (brza kompresija – kratko vreme nastupa i otpuštanja), praktično se može smatrati da samo sibilanti bivaju tretirani ovakvim postupkom, jer u trenucima njihovog nastupa ostale komponente signala praktično ne postoje.

Još jedan interesantan način upotrebe *Sidechain* petlje se sreće u situacijama kada je potrebno obezbediti potpuno elieminisanje brzih početnih tranzijenata signala koji se procesira. U takvim situacijama je moguće u glavni tok signala ubaciti jednu liniju za kašnjenje (*Delay*) koja obezbeđuje da signal koji se komprimuje (ili još češće limituje u ovakvim primenama)

dolazi da kola za redukciju u trenucima kada je ono već sigurno aktivirano preko nezakašnjelog *Sidechain* ulaza (slika 65). Ova tehnika može biti korisna u digitalnim sistemima gde se često ne sme dozvoliti ni kratkotrajno prekoračenje graničnog nivoa A/D konvertora.



Slika 65: Principijska blok šema realizacije efikasnog potiskivanja početnih tranzijenata signala upotrebom uređaja za kašnjenje signala u glavnom toku signala

Sidechain funkcija se često koristi i u slučajevima kada je potrebno napraviti „prostor“ za vokal u ostatku zvučne slike. Kompletan zvuk matrice se u tim situacijama dovodi na ulaz kompresora, dok se vokalom kontroliše njegov rad preko *Sidechain* petlje. Ovo je postavka koja se kao po pravilu koristi u TV i filmskoj produkciji za potrebe sinhronizacije i snimanja različitih glasovnih poruka, kada se kompletan zvuk koji nije glas na ovaj način automatski utišava u situacijama kada se glas pojavi. Ovakav postupak, s obzirom na često korišćenje, ima i svoje ime – *ducking*, termin koji upućuje na činjenicu da se matrica čujno potiskuje i ostavlja mesto za dominantnu ulogu glasa u trenucima njegove pojave. U muzičkoj produkciji slična, samo znatno suptilnije realizovana postavka (mali odnosi kompresije, kratko vreme otpuštanja) se koristi pre svega u savremenoj *dance-pop* produkciji. Ređe cela matrica, a češće samo oni signali koji dominiraju u numeru kada vokal nije prisutan, se dovode na ulaz kompresora, kome je vokal doveden na *Sidechain* ulaz. Na taj način se obezbeđuje suptilno potiskivanje tih vodećih zvukova u trenucima kada je vokal prisutan, uz njihovo vraćanje u prvi plan kada vokala nema. Ova pojava nikako bi trebala biti čujna u smislu onoga što *ducking* jeste, već krajnje suptilna u tom smislu da omogućuje vokalu da se „lakše“ izbori sa dominantnim zvucima u matrici, istovremeno im omogućavajući da oni ostanu takvi u trenucima kada nije prisutan. Ovakav postupak, uz ispravno podešavanje parametara

kompresije, jeste suptilniji od primene automatizacije, i često može da dovede do zanimljivog ritmičkog „disanja“ kompozicije u ritmu koji diktira vokal.

Česta je situacija, pogotovo u elektronskoj muzici, gde je u miksu potrebno napraviti mesto za neometan i jasan nastup svakog pojedinačnog udarca bas bubnja, kao vodećeg ritmičkog elementa. I dok pokušaj da se takvo mesto bas bubnja u ukupnoj zvučnoj slici obezbedi upotrebom ekvilajzera često vodi ka uzrokovanju novih problema, upotreba *sidechain* kompresije često ovu situaciju rešava na krajnje elegantan način. Ukoliko se krene od činjenice da mesto nastupu bas bubnja obezbeđuje pravilna usklađenost sa zvukom pre svega bas deonice, lako se dolazi do zaključka da komprimovanje bas linije uz dovođenje bas bubnja na *sidechain* ulaz dovodi do potrebnog potiskivanja zvuka bas linije samo u trenucima nastupa bas bubnja, omogućavajući mu da u potpunosti dospe u željeni prvi plan. U svim ostalim trenucima, između dva udarca bas bubnja, bas linija neometano funkcioniše. Ova tehnika, iako slična onoj opisanoj kod tretiranja istih instrumenata primenom gejtta, jeste od pomenute suštinski različita. Upotreba gejtta u istoj konfiguraciji dovodi do puštanja bas linije u matricu samo u trenucima kada je prisutan bas bubanj, sa željom preciznog ritmičkog poklapanja ta dva instrumenta, dok primena kompresora ima za cilj da obezbedi, kao što je rečeno, neometan nastup bas bubnja u trenucima njegovog nastupa.

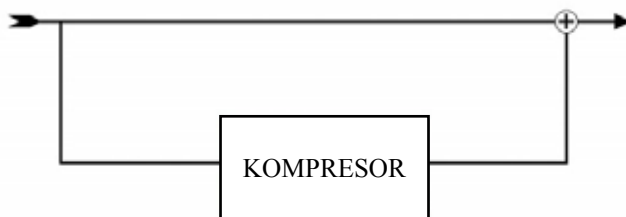
U prethodnom tekstu je kao primer prenaplašenog rada kompresora pomenuta pojava tzv. *pumping* efekta, koji se manifestuje kao čujna previše čujna razlika nivoa tretiranog zvuka u situacijama kada je signal iznad i ispod praga. I dok pumpanje jeste efekat do kojeg može doći usled pogrešnog tretiranja kompresora, ponekad je upravo ova pojava nešto što se želi izazvati u cilju postizanja određenih produkcijskih efekata. Pumpanje se veoma lako izaziva upotrebom *Sidechain* funkcije kada se parametri kompresije postave na nešto radikalnije nivoe (nizak prag, visok odnos kompresije i kraće vreme otpuštanja). Ukoliko se pri takvom setovanju na ulaz kompresora dovede određeni signal (vrlo često se u cilju postizanja čujnih i dramatičnih efekata za to koristi kompletna matrica), a na *Sidechain* ulaz bas bubanj, lako se može detektovati promena nivoa cele matrice u ritmu specifičnog pumpanja: nivo odlazi na dole u trenutku nastupa bas bubnja, pa se opet vraća na gore kada bas bubnja nema. Numere grupe „Daft punk“ – „*One more time*“ i „*Around the World*“ iz 90ih godina XX veka se često navode kao rani i veoma uspešni primeri ovako radikalne upotrebe bas bubnja u *sidechain* kompresiji. Ohrabreni uspesima na ovaj način tretiranih numera, producenti su počeli znatno više da eksperimentišu i koriste efekat pumpanja, tako da je njegova upotreba danas veoma česta pre svega u EDM (*Electornic Dance Music*) i *American Pop* žanrovima, gde se koristi da naglasi specifične ritmičke strukture.

Upotreba *Sidechain* tehnike je izuzetno prosta u radu sa hardverskim uređajima: dovoljno je na *Sidechain* ulaz uređaja dovesti željeni signal preko nekog od pomoćnih izlaza

iz miksera (*Aux* ili *Bus send*), i stvar već funkcioniše. Danas se u radu verovatno češće koriste softverske verzije ovih tipova uređaja, koje u najvećem broju takođe podrazumevaju postojanje *sidechain* opcije. U *Pro Tools* sekvenceru je pristup ovoj tehnici najlakše realizovati na taj način što se signal koji se želi dovesti na *sidechain* ulaz pošalje na bilo koji slobodan bus izlaz iz kanala (npr. Bus 1). Nakon toga se na kanal instrumenta koji se želi komprimovati insertuje željeni gejt/kompresor, a *sidechain* ulaz u plug-in se podesi na Bus 1. *Sidechain* ulaz se najčešće označava kao *key-input* dugme, čijim se selektovanjem aktivira padajući meni iz kojeg se bira konkretan Bus sa kojeg se želi primiti signal u *sidechain* petlju. Ovakav postupak je manje-više sličan u svim ostalim danas korišćenim sekvencerima.

Kao poseban način upotrebe kompresora u postupcima miksa često se sreće tzv. paralelna kompresija. U suštini, ovaj postupak podrazumeva da se jedan isti signal račva na taj način da u jednom kanalu ostaje potpuno netretiran, dok se u drugom, paralelnom kanalu, podvrgava postupku kompresije. Ova dva kanala se zatim sabiraju u miksu. Ovakav način rada kao po pravilu podrazumeva ekstremnu upotrebu kompresije, sa nivoima redukcije signala od preko 20 dB. Ukoliko se sada ovako jako komprimovan signal podmiksuje sa originalnim signalom istim nivoom pojačanja (regleri na kanalu miksera su postavljeni na isti nivo), može se reći da je njegov udeo u ukupnom nivou signala u trenucima kada je kompresor aktivan praktično zanemarljiv. To za posledicu ima da sve karakteristike signala koje definišu njegov karakter, oličene pre svega kroz brze i delikatne tranzijente koji bivaju bitno „oštećeni“ u klasičnom postupku kompresije, ostaju očuvani u ukupnom signalu. Onog trenutka kada signal padne ispod praga kompresije, signal u kanalu sa kompresijom se vraća na isti nivo kao u kanalu sa nekompresovanim signalom, što znači da u ukupnom zbiru imamo dva istovetna signala, odnosno porast ukupnog nivoa za +6 dB. Dakle, ovakvim postupkom dolazi do izdizanja nižih nivoa signala za 6 dB, pri čemu je ovo izdizanje potpuno nedestruktivno i ni na jedan način ne utiče na strukturu signala jer se radi o prostom sabiranju dva originalna signala.

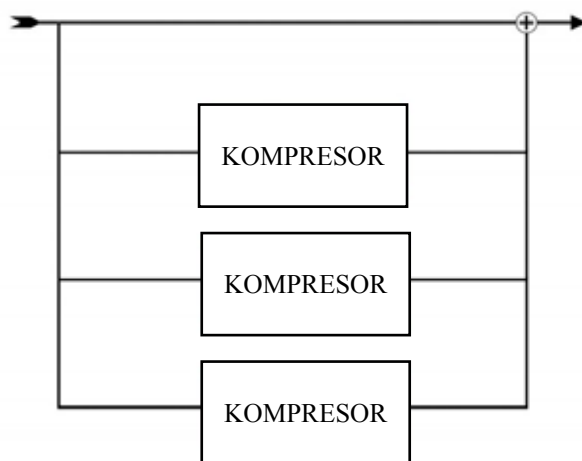
REALIZACIJA PARALELNE KOMPRESIJE



Slika 66: Principna blok šema postupka paralelne kompresije koja obezbeđuje kompresiju signala od 6 dB

Ovde je bitno uočiti da ovakav postupak suštinski jeste kompresija, samo što ovog puta ona ne podrazumeva klasično i do sada opisivano potiskivanje signala iznad praga kompresije (ovaj postupak je neminovno destruktivan, utiče na karakter signala i veoma zavisi od konkretnog uređaja koji se koristi), već potpuno benigno pojačavanje signala ispod praga kompresije. Konačan rezultat je istovetan – ukupan opseg dinamike je smanjen, u ovom slučaju za fiksnih 6 dB. Veći nivoi redukcije se ovakvom tehnikom postižu upotrebom većeg broja paralelno komprimovanih signala – u radu sa ukupno 4 kanala, pri padu nivoa signala ispod praga kompresije dolazi do izdizanja „tiših“ deonica u odnosu na „glasnije“ koji su komprimovani u ukupnom iznosu od 12 dB.

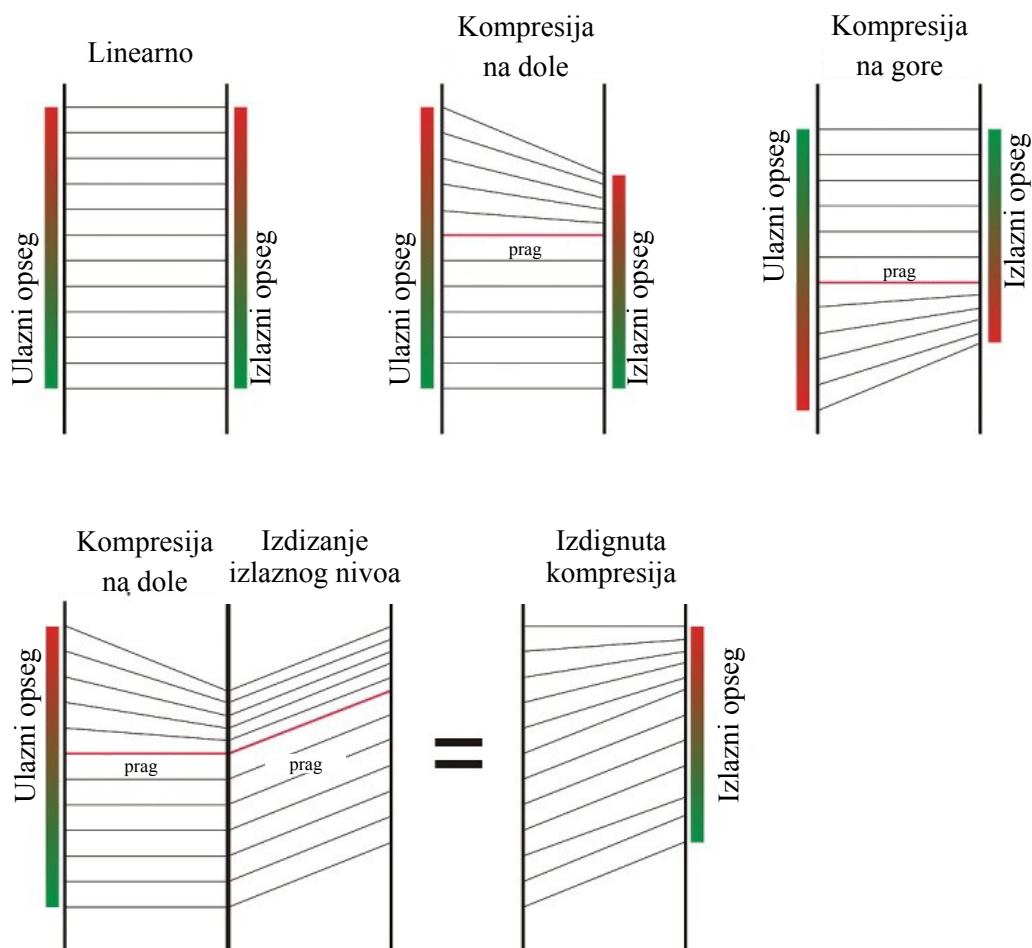
REALIZACIJA PROŠIRENE PARALELNE KOMPRESIJE



Slika 67: Principna blok šema postupka proširene paralelne kompresije koja obezbeđuje ukupnu kompresiju signala od 12 dB

U ovakvim proširenim sistemima paralelne kompresije moguće je u svakom kanalu koristiti različite kompresore, kako bi se omogućio specifičan karakter u podmixu konačnog zvuka kada se kompresija obavlja.

Ovakav tip kompresije se često naziva *Upward* kompresija (kompresija na gore – izdizanje tihih u odnosu na glasne nivoe signala), za razliku od klasične kompresije koja se u tom smislu označava terminom *Downward* (kompresija na dole – potiskivanje glasnih nivoe signala). Grafički prikaz osnovnih principa ova dva koncepta kompresije signala su prikazani na slici 68.



Slika 68: Grafički prikaz osnovnih koncepata kompresije audio signala

Upward kompresori se izuzetno retko sreću na tržištu audio opreme, jer je njihova hardverska realizacija povezana sa nizom problema. Iako se na prvi pogled može činiti da je ova dva tipa kompresije moguće pomoću izdizanja izlaznog nivoa (*Output gain* funkcije) svesti na isti rezultat (poslednji prikaz na slici 68 – izdignuta (*Uplift*) kompresija), još jednom se treba setiti da klasično komprimovanje na dole u samoj svojoj prirodi uvek podrazumeva kompromis sa bitnim tranzijentnim karakteristikama zvuka, usled čega se i dešava da svaki pojedinačni tip ovih uređaja daje specifičan karakter konačnom komprimovanom zvuku, što veoma često nije poželjna osobina. Upotreba ovog tipa kompresije stoga uvek treba biti promišljena i sa svesnom namerom koja se očituje kroz uvek neophodno pitanje na koje producent u svakom trenutku mora imati jasan odgovor: „Da li je, zašto i na koji način potrebno

izvršiti kompresiju određenog audio signala?“. Bez jasnog odgovora na ovako formulisano pitanje kao po pravilu je bolje ne ulaziti u postupak kompresije, upravo iz razloga neminovnog uspostavljanja kompromisa između originalnih soničnih vrednosti signala na ulazu u uređaj i konačnog zvuka koji se na izlazu iz kompresora dobija. Paralelna kompresija je dobar način da se ovakvi nedostaci odstrane i kompresija učini manje problematičnim postupkom, uz istovremeno zadržavanje kontrole i bitnih aspekata koje komprimovanje signala u postupku miksa omogućava.

PITANJA ZA PROVERU ZNANJA

1. Koja je osnovna podela uređaja za obradu dinamike audio signala?
2. Na koji način se ovi uređaji povezuju u audio lanac?
3. Šta je to diodni ograničavač?
4. Zašto su uvedeni ograničavači sa povratnom spregom?
5. Šta je to vreme reakcije?
6. Šta je vreme otpuštanja?
7. Kako se realizuje multiband kompresor?
8. Šta je vreme zadržavanja?
9. Na kom principu radi gejt?
10. Šta je ekspander i koji su primeru njegove primene?
11. Šta je to *Sidechain insert* ?

FILTERI I EKVILAJZERI

V deo

Najčešći postupak manipulacije audio signalom u kontekstu muzičke produkcije je podešavanje boje zvuka pojedinih instrumenata, grupa instrumenata ili celog snimka. Ovaj tip manipulacije podrazumeva upotrebu namenskih filtera, ili filterskih sekcija koje se označavaju zajedničkim imenom ekvilajzer. Filteri, koji se mogu realizovati u analognoj ili digitalnoj tehnici, su uređaji koji tretiraju spektar signala, ističući ili potiskujući određeni opseg, u skladu sa odlukom koju donosi muzički producent. Ekvilajzeri su uređaji koji imaju mogućnost da audio signal tretiraju u više frekvencijskih podopsega, i kao takvi se sastoje od grupa namenski projektovanih i međusobno usklađenih pojedinačnih audio filtera. Ovo poglavlje je podeljeno u sledeće tematske celine:

1. Podela audio filtera
2. Ekvilajzeri
3. Upotreba filtera i ekvilajzera

Istorija ekvilajzera datira još od sredine 19. veka kada se javila potreba za frekvencijskim tretiranjem električnih signala koji su prenošeni sa jednog kraja transatlanskog kabla na drugi, tj. između pošiljaoca s jedne i primaoca s druge strane istog. Irski fizičar i inženjer William Thompson matematički je modelovao slabljenje i rasipanje električnog signala u kablu, i tom prilikom je primetio da je uzrok slabljenja signala, pre svega na visokim frekvencijama, električna kapacitivnost kabla. Taj problem ga je naveo da osmisli i dizajnira novu napravu koju je nazvao „*Automatic curb sender*” (što bi u bukvalnom prevodu značilo sredstvo ili naprava za automatsko ograničavanje pošiljke) - elektromehaničku napravu čiji je zadatak bio da umanjí efekte opisanog slabljenja električnih signala.

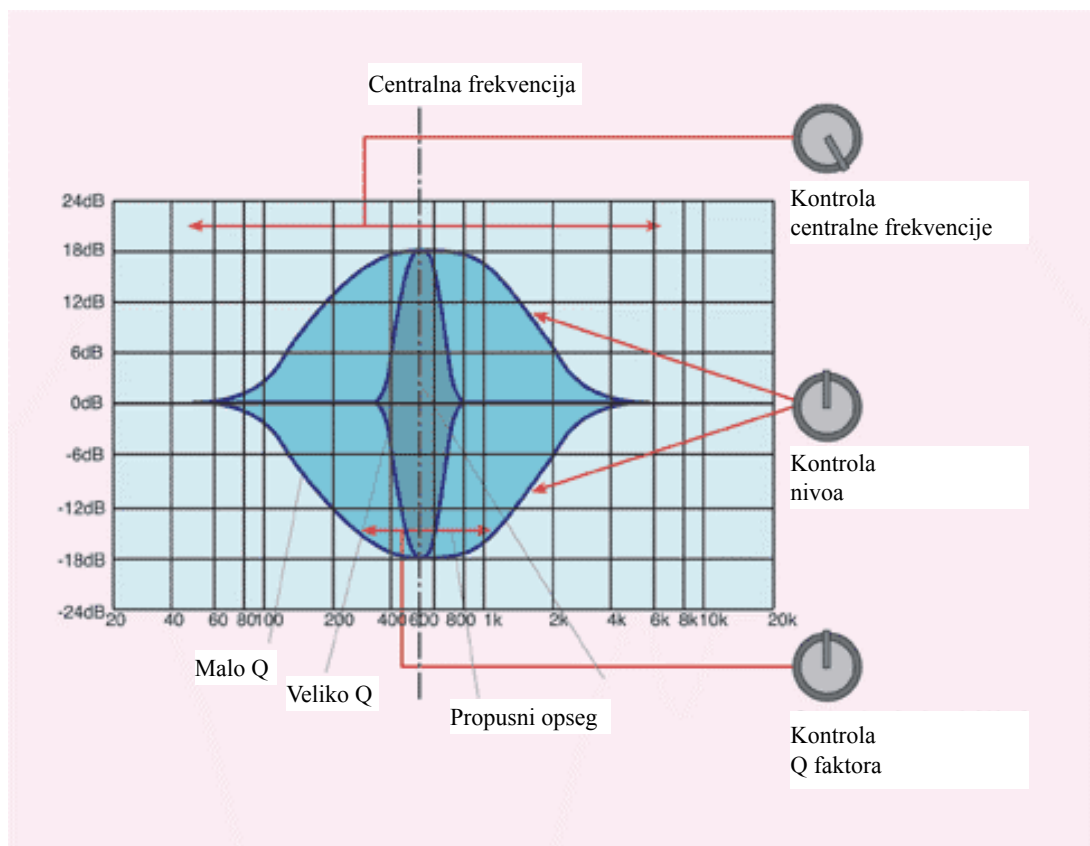
Sledeći veliki korak u ranoj primeni uređaja koji jesu preteče savremenih ekvilajzera bio je iniciran potrebom za održavanjem frekvencijskog sadržaja signala prenošenog na daljinu u ranim sistemima telefonije. U razvoju ove tehnologije ključnu ulogu su imali radovi Mihajla Pupina, koji su rezultirali u tehnici sinteze linearnih filtera sastavljenih od kalemova, kondezatora i otpornika. Ova tehnika je morala da obezbedi stabilnost električnog signala tj. verodostojnost ljudskog glasa koji se prenosio telefonskim žicama, što su omogućavali ekvilajzeri, neizostavni elementi koji se koriste i u modernoj telefoniji. Dakle, prva primena ekvilajzera bila je u oblasti prenosa signala električnim vodovima, dok je tokom kasnijeg razvoja tehnologije ovaj tip uređaja postao neizostavan i u ostalim oblastima, poput radija, televizije, snimanje i obrada audio signala, te muzičke produkcije.

5.1 Podela filtera

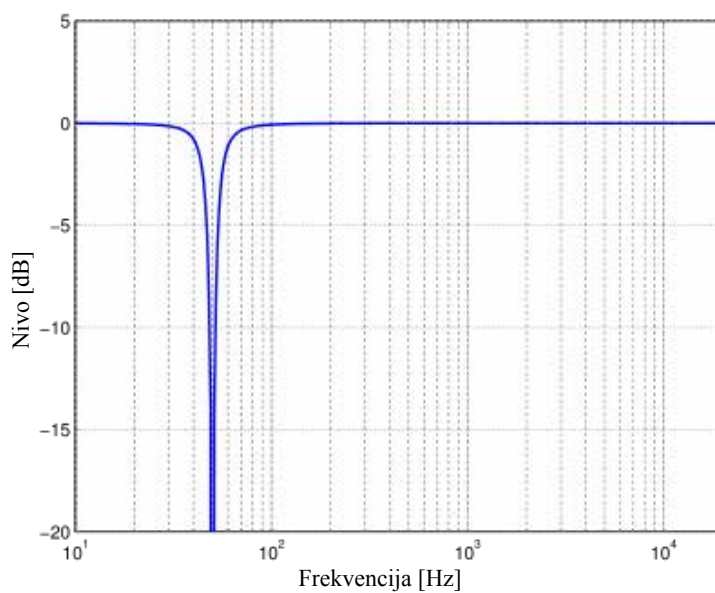
Sve audio filtere delimo u dve osnovne grupe, u skladu sa načinom na koji tretiraju zadati frekvencijski opseg: *peak* (engl. *peak* – vrh) i *shelf* (engl. *shelf* – polica) filtere. Pik filteri najjače utiču na signal (maksimalno ga izdižu ili potiskuju) na jednoj, tzv. centralnoj frekvenciji, dok njihov uticaj na frekvencijama oko centralne proporcionalno opada kako se od nje udaljavamo. Način funkcionisanja ovog tipa filtera je potpuno definisan sa tri parametra: centralnom frekvencijom, nivoom izdizanja (engl.- *boost*) ili potiskivanja (engl. – *cut*) na njoj i oblikom karakteristike filtra koja se često naziva zvonasta kriva zbog svog karakterističnog izgleda. Nivo izdizanja ili potiskivanja se izražava u decibelima, dok je oblik zvonaste krive pre svega definisan tzv. Q faktorom. Vrednost ovog parametra se izražava u neimenovanim brojevima, i to po sledećem principu: što je vrednost Q faktora veća – zvonasta kriva je uža i strmija a intervencije na audio signalu drastičnije, dok manje vrednosti Q faktora dovode do raširenijeg oblika zvona, koji obezbeđuje manje drastične intervencije u spektru signala. Pik filteri sa manjim vrednostima Q faktora (od 0.3 do 1) se u tom smislu smatraju muzikalnijim i češće se primenjuju u intervencijama koje za cilj imaju prirodniji rezultat u konačnom zvučanju.

Kao posebna podvrsta pik filtera se pojavljuju filteri sa ekstremno velikim vrednostima Q faktora, koji često služe za potiskivanje nekih neželjenih komponenti u signalu (uskopojasne smetnje poput pištanja, zujanja i sl.), i za takve potrebe se namenski projektuju. Iz tog razloga se u praksi sreću pod posebnim imenom: *notch* filteri (engl. *notch* – usek, zarez).

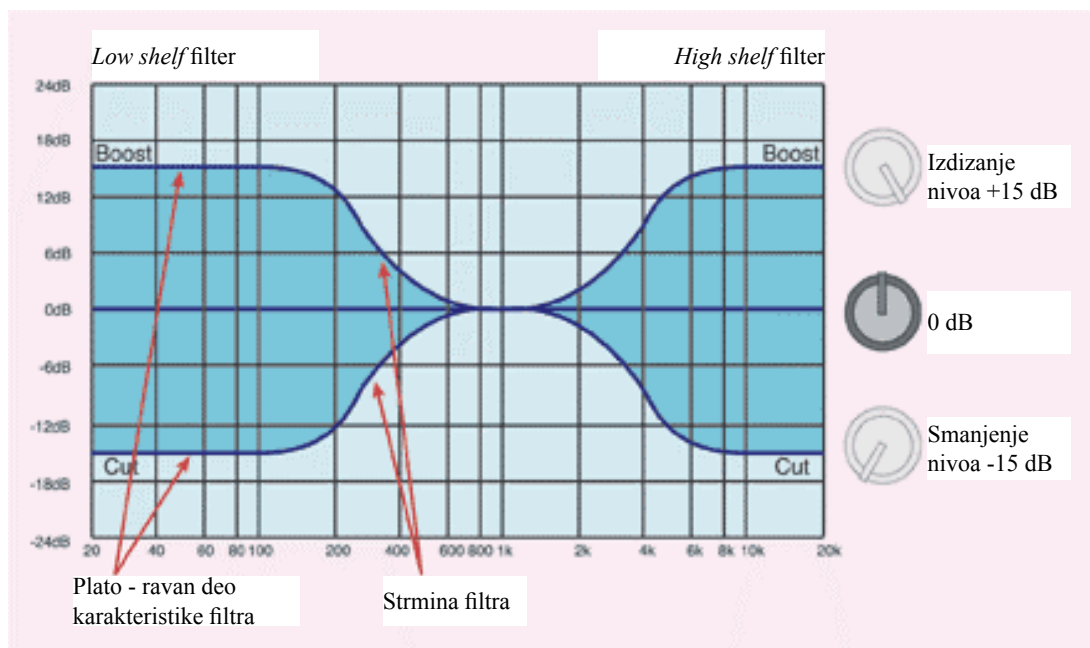
Šelf filteri su filteri koji utiču ravnomerno na sve frekvencije iznad ili ispod neke prethodno zadate, tzv. granične frekvencije (engl. – *cut off frequency*). Ganična frekvencija se definiše kao frekvencija na kojoj je propusna karakteristika filtra opala (ili porasla) za 3 dB. Ravnomeran uticaj ovakvim filterima na željeni opseg frekvencija nije moguće ostvariti neposredno iznad ili ispod granične frekvencije, već do njega dolazi tek nakon što filter dostigne svoj maksimalni uticaj. Kolika će ta prelazna zona biti zavisi od parametra koji se naziva strmina filtra (engl. – *slope*). Treći parametar koji definiše karakteristiku ovih filtera je nivo izdizanja (engl.- *boost*), ili potiskivanja (engl. – *cut*) signala iznad (ili ispod) granične frekvencije.



Slika 69: Tipičan izgled karakteristike peak filtera sa prikazom parametara za njeno podešavanje

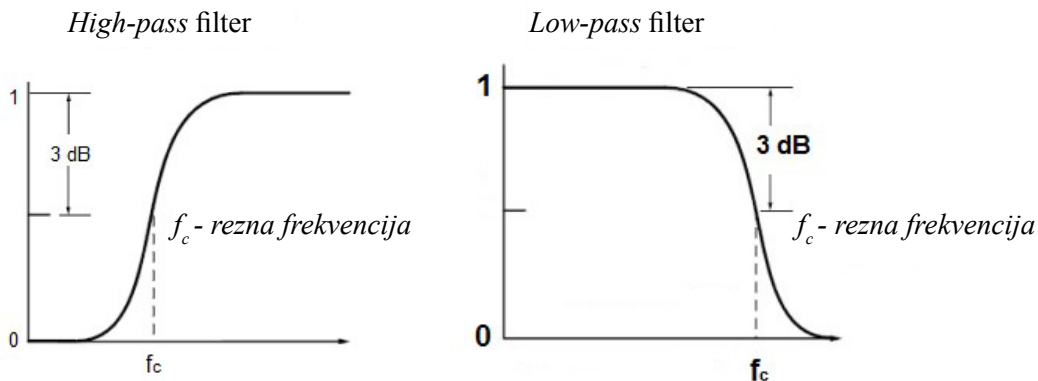


Slika 70: Prikaz karakteristike notch filtera projektovanog da eliminiše uskojasmu smetnju napajanja na frekvenciji $f = 50$ Hz



Slika 71: Tipičan izgled karakteristike shelf filtera sa prikazom parametara za njeno podešavanje

Poseban tip šelf filtera su filteri propusnici visokog (engl. - *high pass*) i niskog (engl. - *low pass*) opsega frekvencija. *High pass* filteri su tako projektovani da potpuno potiskuju sve frekvencije ispod granične (koja se obično nalazi u opsegu od 30-300 Hz), dok na opseg ispod granične frekvencije ne utiču. *Low pass* filteri za cilj imaju potpuno obrnuto: da u potpunosti potisnu viši opseg frekvencija, iznad neke zadate granične (koja je najčešće između 3 kHz i 15 kHz), dok na opseg frekvencija ispod nje ne utiču. Kod ovako dizajniranih filtera, dakle, nije moguće uticati na nivo potiskivanja komponenti signala iznad (ili ispod) granične, kao kod klasičnih šelf filtera, već je ovo potiskivanje potpuno.



Slika 72: Tipičan izgled karakteristika High-pass i Low-pass filtera

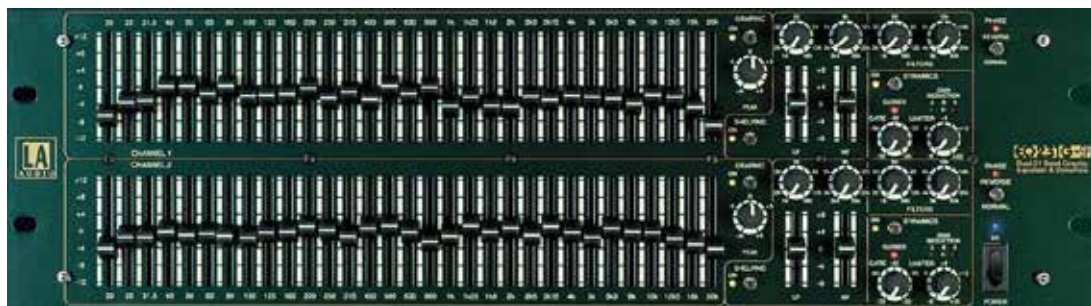
5.2 Ekvilajzeri

Da bi se audio signal u potpunosti i na zadovoljavajuć način istretirao u spektralnom domenu, najčešće nije dovoljno imati na raspolaganju samo jedan filter. Iz tog razloga se filteri grupišu u sekcije koje se nazivaju ekvilajzeri, u okviru kojih se svi pojedinačno mogu koristiti u isto vreme. Čest način grupisanja, koji se može sresti na većini analognih audio miksera, je takav da se opseg niskih i visokih frekvencija tretiraju šelf filtrima, dok se opseg srednjih frekvencija tretira upotrebom dva pik filtra. Ovo je tzv. četvoropojasni ekvilajzer, koji u velikom broju slučajeva biva dovoljan za kvalitetno tretiranje signala. Digitalna tehnika omogućava relativno laku realizaciju ekvilajzera i sa većim brojem pojedinačnih filtera (sedmopojasni, dvanaestopojasni ekvilajzeri i sl.).

U praksi, u zavisnosti od broja i tipa parametara na koje krajnji korisnik može uticati u radu sa ekvilajzerom, mogu se sresti tri tipa ekvilajzera:

1. Grafički ekvilajzeri (engl. – *graphic equalizers*)
2. Ekvilajzeri sa kliznom frekvencijom (engl. – *sweep equalizers*)
3. Parametrički ekvilajzeri (engl. – *parametric equalizers*)

Grafički ekvilajzeri su ekvilajzeri koji se sastoje od niza pik filtera kod kojih se može uticati samo na nivo izdizanja ili potiskivanja signala. Centralne frekvencije i Q faktori svih filtera u okviru grafičkog ekvilajzera su unapred zadati i ne mogu se menjati. S obzirom na ovakvu postavku, grafički ekvilajzeri se najčešće realizuju kao serija filtera koji pokrivaju ceo frekvencijski opseg. U tom smislu razlikujemo oktavne i terčne grafičke ekvilajzere. Oktavni ekvilajzeri imaju po jedan filter u svakoj oktavi (desetopojasni grafički ekvilajzeri), najčešće na centralnim učestanostima koje su standardizovano pozicionirane na 31 Hz, 62 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz i 16 kHz. Terčni ekvilajzeri poseduju po jedan filter u okviru svake terce čujnog opsega i realizuju se u 27 i 31 pojasnoj verziji. Dizajn ovih uređaja je takav da se izdizanje ili potiskivanje frekvencija realizuje kliznim potencimetrima koji su poređani jedan pored drugog (slika 73), tako da se konačan izgled krive ekvilizacije na celom opsegu frekvencija može lako uočiti i grafički predstaviti (odatle i ime ovog tipa ekvilajzera).



Slika 73: Tipičan izgled grafičkog ekvilajzera

U prethodnom tekstu je pomenuta činjenica da analogni miks pultevi u najvećem broju slučajeva poseduju četvoropojasni ekvilajzer na svakom kanalu, pri čemu su dva filtera u toj sekciji shelf a ostal dva pik tipa. Ovakav koncept, koji se pokazao kao sasvim dovoljan za komforan rad u većini slučajeva, je baziran na činjenici da je pik filterima u okviru ove sekcije moguće podešavati dva parametra: centralnu frekvenciju i nivo izdizanja (ili potiskivanja) na njoj. Kada ekvilajzer sa kojim se radi ima ovakvu mogućnost manipulacije, govorimo o tzv. sweep ekvilajzerima, odnosno ekvilajzerima kod kojih je centralnom frekvencijom moguće „klizati“ po frekvencijskoj osi, i pozicionirati se na onom mestu gde je intervencija najpotrebnija. Podešavanje trećeg parametra pik filtera (Q faktor) kod sweep ekvilajzera nije moguće.

Ekvilajzeri koji pružaju mogućnost podešavanja sva tri parametra (centralna frekvencija, nivo i Q faktor) pružaju potpunu fleksibilnost u radu i nazivaju se parametričkim ekvilajzerima. Realizacija ovakvih ekvilajzera u analognoj izvedbi predstavlja složen problem koji ih čini najskupljim tipom ekvilajzera na tržištu. *Daniel N. Flickinger* konstruisao je prvi parametrički ekvilajzer početkom 1971. godine. Godine 1972. *George Masenburg* uvodi pojam parametričkog ekvilajzera u svom radu predstavljenom na 42. AES konvenciji. Većina parametričkih ekvilajzera konstruisana nakon ovoga, napravljena je po principima i topologiji kola uspostavljenim u ovom periodu ranih sedamdesetih godina.

U praksi se sreću i kombinacije ovih tipova ekvilajzera. Sweep – grafički (kod kojih se može „klizati“ u uskom opsegu oko unapred zadatih frekvencija najčešće oktavnog grafičkog ekvilajzera), para – grafički (kod kojih se na manjem broju filtera (5-6) može ograničeno klizati i podešavati Q faktor) i kvazi-parametrički (kod kojih se Q faktor može birati između nekoliko, najčešće 2 ili 3, unapred zadate vrednosti).

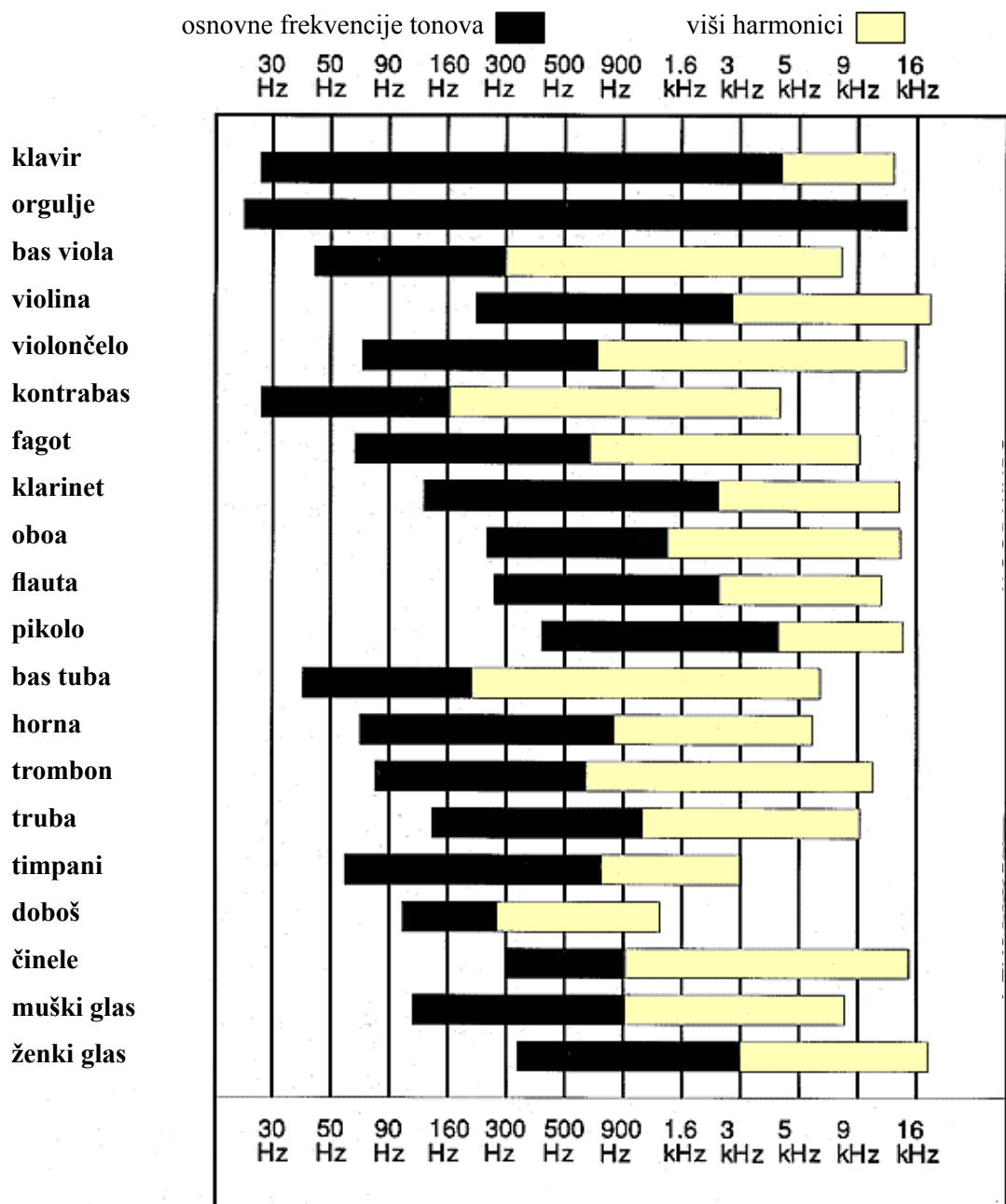
5.3 Upotreba filtera i ekvilajzera

Analogni filteri i ekvilajzeri su komponente koje se sastoje od velikog broja pasivnih elektronskih elemenata, otpornika, kalemova i kondenzatora, koji u sadržaj audio signala unose, osim neminovnog šuma, i različite tipove faznih pomeraja u različitim frekvencijskim podopsezima. Ovu činjenicu treba imati na umu pri svakom donošenju odluke o korišćenju ovih elektronskih sklopova za obradu zvuka: sve intervencije koje dovode do boljeg tonskog balansa i lepše boje zvuka su neminovan kompromis sa unošenjem šumova i faznih izobličenja originalnih signala. Ova izobličenja su još izraženija pri višim vrednostima korišćenih parametara, kada elektronika ulazi u tzv. nelinearne režime rada: velike vrednosti korišćenih nivoa izdizanja ili potiskivanja (preko 5-6 dB) ili Q faktora svakako utiču na manju prirodnost i narušen balans frekvencijskog sadržaja pre svega akustičnih instrumenata (što ponekad može biti i namera), ali i na izraženiju pojavu šumova i faznih izobličenja.

High-pass filter se često koristi u svrhe „čišćenja“ kanala od neželjenih niskofrekvencijskih smetnji (udarci u mikrofonski stalak, šumovi instalacija u prostoru, saobraćaj u daljini i sl.). Upotreba ovog filtera, zbog njegove „isključivosti“ u tretiranju frekvencija, bi trebala da bude takva da njegova granična frekvencija bude postavljena ispod najniže osnovne frekvencije tona koji instrument koji tretiramo može da odsvira. Na taj način možemo biti sigurni da upotrebom *high-pass* filtera nismo kompromitovali zvuk samog instrumenta. U tom smislu je dobro poznavati frekvencijske raspone pojedinih instrumenata, koji su prikazani na slici 74.

Kako bi ekvilizacija bila uspešno izvedena, bilo bi dobro što tačnije definisati šta želimo da postignemo. Ekvilizaciju (kao ni bilo koji drugi postupak u miksu) ne treba vršiti ukoliko ne postoji jasno definisana potreba i cilj. Postoje dva glavna, međusobno povezana, razloga za ekvilizaciju zvuka: da bi se izbeglo maskiranje (preklapanje) komponenti različitih zvukova u miksu, ili radi promene samog karaktera zvuka pojedinačnih instrumenata. Ova promena karaktera zvuka može opet biti dvojaka: ili da se istakne i unapredi prirodnost zvuka snimljenog instrumenta, ili da se od početnog zvuka napravi novi, osetno, možda čak i do neprepoznatljivosti, drugačiji zvuk.

Maskiranje je fenomen koji nastaje u situaciji kada više zvukova, koji se simultano reprodukuju, a pri tome zahvataju slične, ili iste frekvencijske opsege, utiču jedan na drugi na taj način da se u konačnom miksu gube željene komponente ili međusobni odnosi pojedinačnih zvukova. Ovaj problem je posebno izraženo na niskim frekvencijama: što su frekvencije niže, više je „prostora“ potrebno kako bi zvuk zadržao svoju definisanost i jasnoću u ukupnom miksu. Jedan od najčešćih i najviše analiziranih problema preklapanja jeste interakcija



Slika 74: Frekvencijski opsezi osnovnih harmonika tonova pojedinih instrumenata

deonica bas bubnja i bas gitare. U klasičnoj pop, rok ili dens numeri, deonice bas bubnja i bas gitare praktično u potpunosti definišu opseg niskih frekvencija i ritmički karakter pesme, i učiniti da se oni međusobno ne preklapaju na negativan način je konstantan problem sa kojim se producenti svakodnevno susreću. Ako je nedovoljno pažnje posvećeno interakciji ova dva instrumenta, lako može doći do pojave „mutnog“ i nedefinisanog zvuka u donjem registru, koji numeru ne nosi na pravi način, čineći da krajnji rezultat u samoj svojoj ritmičkoj osnovi, što jeste suština muzike ovog tipa, ne bude zadovoljavajuć. Isti tip problema može naravno nastati i u bilo kom drugom opsegu frekvencija, između bilo kojih instrumenata čiji se tonalni karakteri preklapaju na gore opisan način.

Ovaj problem do kojeg dolazi u fazi miksa, može u znatnoj meri biti olakšan ukoliko se u fazi snimanja (ili odabira semplova) unapred planira željeni karakter zvuka i međusobni odnosi korišćenih instrumenata. Ovo je moguće postići prigodnim štimovanjem perkusivnih instrumenata, odabirom različitih tipova električnih i bas gitara, pojačala, pozicijom i odabirom mikrofona pri usnimavanju - dakle svim onim što u startu može definisati zvuk instrumenta na taj način da mu se dodeli jasna uloga u kontekstu konačnog miksa.

Svi instrumenti, kako god da je realizovan snimak, imaju komponente koje se nalaze u praktično celom čujnom opsegu, tako da efekat preklapanja teoretski nije moguće potpuno izbeći bez obzira na kvalitet planiranja u fazi predprodukcije. U tom smislu, ovaj problem se u fazi miksa uvek i iznova rešava upotrebom ekvilajzera. U tom cilju na producentu je da ima jasnu sliku o tome koji instrument će dominirati u kom frekvencijskom opsegu. Ekvilajzerom se mogu ukloniti ili smanjiti manje bitne komponente zvuka svakog pojedinačnog instrumenta, kao i dodatno naglasiti one bitne. Kako bi zvuk dominirao određenim frekvencijskim opsegom, potrebno je korigovati ostale zvuke u tom opsegu, i/ili naglasiti dominantni zvuk. Većina zvukova poseduje energiju, kako smo već napomenuli, u celom čujnom opsegu, ali je ta energija, u zavisnosti od samog izvora zvuka, koncentrisana u određenim delovima spektra. Ove „kritične regije“ su esencija zvuka svakog instrumenta ponaosob, i predstavljaju njihov deo koji će im definisati konačnu poziciju u miksu.

Pri tome treba imati na umu nekoliko polaznih odrednica:

1. Izdizanje nekog opsega frekvencija je suštinski isto što i smanjenje onog opsega koji ostaje neizdignut. Na isti način treba imati na umu da potiskivanje nekog opsega u konačnom rezultatu jeste izdizanje nepotisnutog dela opsega. U tom smislu treba donositi odluke da li posezati za izdizanjem ili potiskivanjem opsega. Izdizanje opsega se vrši na onim delovima spektra u kojima se nalazi karakteristika zvuka koju želimo naglasiti, dok se za potiskivanje odlučujemo u onim opsezima u kojima se nalaze komponente zvuka koje nam smetaju u konkretnoj situaciji. Često se sreće mišljenje da je potiskivanje opsega bolji izbor, jer se na taj način oslobađa (ne zauzima) opseg u kojem do izražaja mogu doći karakteristike zvuka nekog

drugog instrumenta u ukupnom miks. Ovo je logičan pristup, kojem treba težiti ukoliko je moguće. U ovakvom pristupu može se koristiti način rada koji podrazumeva izdizanje užeg opsega frekvencija i klizanje po frekvencijskoj osi, dok se ne uoči komponenta zvuka koja nam u ukupnom zvuku trenutno tretiranog signala smeta. Nakon takvog detektovanja problematičnog opsega, karakteristika filtra se obrće, i vrši se potiskivanje dok se neželjena komponenta zvuka ne svede na prihvatljiv nivo. Ovakav pristup je bitno olakšan ukoliko pri slušanju nefiltriranog zvuka možemo unapred da definišemo šta je to što nam u zvuku kojim se trenutno bavimo smeta.

2. U radu sa ekvilajzerima se, pogotovo nakon određenog vremena navikavanja na konkretne uređaje i stečeno iskustvo u njihovoj primeni, osim racionalnog vrlo često koristi i intuitivni pristup. Oba pristupa su znatno olakšana upotrebom parametričkih ekvilajzera, koji daju maksimalnu slobodu u tretiranju spektra signala. U radu sa ovim tipom ekvilajzera se kao jedna od preporuka može koristiti procedura u kojoj se prvo određuje centralna frekvencija na koju se postavlja filter, a nakon toga definišu vrednosti nivoa izdizanja ili potiskivanja i Q faktora.

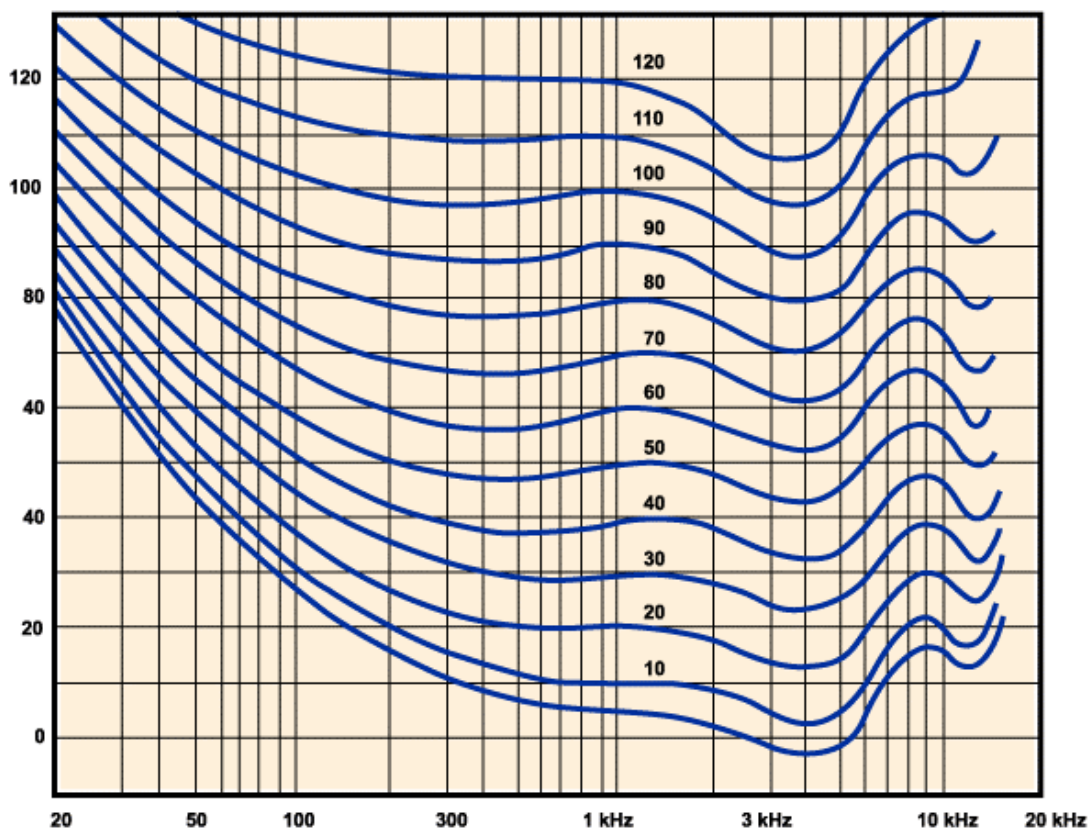
3. Prilikom traženja centralne frekvencije, prvo je potrebno doneti odluku na koji deo spektra se načelno želi uticati, a potom i na koju centralnu frekvenciju pozicionirati karakteristiku filtra. Ponekad, naročito u početku rada sa ekvilajzerima, određivanje dela spektra na koji se želi uticati se određuje metodom pokušaja, opisanog klizanja po spektru i traženja karakteristike zvuka na koju se želi uticati. U tom procesu se može potrošiti dosta vremena, koje se skraćuje stečenim iskustvom i ispravnim upoznavanjem sa frekvencijskim karakteristikama instrumenata sa kojima se producent sreće u svom svakodnevnom radu. Analizator spektra je uređaj koji može pomoći prilikom analize bitnih frekvencijskih opsega. Danas postoje softverski ekvilajzeri koji u sebi već imaju integrisane analizatore spektra, tako da se na jednom grafičkom prikazu mogu videti i karakteristika ekvilajzera i spektar signala, što dodatno olakšava „potragu“ za željenom centralnom frekvencijom karakteristike trenutno korišćenog filtera. U ovoj fazi rada se kao po pravilu koristi tehnika „klizanja“ centralne frekvencije po frekvencijskoj osi. U primeni ove tehnike kao dobra polazna osnova može poslužiti savet da se Q parametar postavi na neku srednju vrednost (možda između 0.7 i 3 do 4), dok se parametar nivoa postavlja na relativno visok pozitivan nivo (+ 4 do +8 dB) kako bi se u slušanju naglasio opseg frekvencija koji se trenutno filtrira i na taj način lakše uočile željene (ili neželjene) karakteristike zvuka za kojima se trenutno traga. Na ovakav pristup radu, koliko god bio logičan, ne treba se preterano navikavati i to iz dva razloga: prvo, dosta je zamoran za uši, i drugo - nakon ovakvog postupka „prebrisavanja“ frekvencija percepcija zvuka, u smislu objektivnosti, ume da bude prilično kompromitovana. Ovakvom procedurom se definiše opseg u kojem se želi intervenisati, dok precizno određivanje centralne frekvencije u okviru tog opsega često i nije toliko kritično. Ako je komponenta zvuka koja se tretira

po svom karakteru posebno istaknuta i naglašena, onda se može posvetiti neko vreme i približnijem pozicioniranju centralne frekvencije, kako bi taj specifični deo opsega bio do kraja detektovan. U tom smislu je moguće ponoviti proceduru proklizavanja, samo ovog puta u okviru već definisanog frekvencijskog podopsega, sa visokim podešavanjima Q faktora. Visoke vrednosti Q faktora će omogućiti da se centralna frekvencija precizno pozicionira na izraženu tonalnu frekvenciju zvuka. Kao rezultat ovakvog pristupa često se dolazi do prepoznatljivog tona koji liči na huk ili zvonjavu u trenutku kada se do kraja „pogodi“ rezonantna ili na drugi način istaknuta komponenta zvuka koji se trenutno obrađuje.

4. Kao što smo već istakli, pri radu sa ekvilajzerima treba u svakom trenutku biti svestan činjenice da se uvo izuzetno lako adaptira na zvuk koji se sluša. Ovo je psihoakustički fenomen koji dovodi do toga da se referenca u smislu onoga zbog čega vršimo korekciju veoma lako može izgubiti. Način na koji se ovaj problem prevazilazi je konstantna upotreba tzv. A/B testa, koji podrazumeva naizmenično uključivanje i isključivanje ekvilajzera sa kojim se trenutno radi, kako bi se mogli čuti rezultati ekvilizacije i uporediti dobijeni zvuk sa početnim, od kojeg se u ekvilizaciju pošlo ka željenom cilju. To je najsigurnij način da obezbedimo da konačan rezultat ekvilizacije bude saglasan sa početnom odlukom i ciljem.

5. A/B poređenje sa ciljem procene rezultata ekvilizacije nema smisla ukoliko se zvuk u stanju sa i bez ekvilizacije reprodukuje različitim nivoima. S jedne strane to je posledica činjenice da ljudsko uvo na različitim nivoima slušanja različito percipira frekvencijski balans niskih, srednjih i visokih frekvencija (izofonske krive, tačka 13), ali i činjenice da je veoma čest subjektivan osećaj da glasniji zvuk zvuči „bolje“ od tišeg (sintagma „*louder is better*“ koja se veoma često sreće u svetu muzičke produkcije). S obzirom da svako tretiranje signala ekvilajzerom podrazumeva pojačavanja ili utišavanja pojedinih frekvencijskih podopsega, konačan nivo tretiranog signala će biti različit od početnog. Iz tog razloga je neophodno na odgovarajućem mestu izvršiti korekciju nivoa zvuka tretiranog signala (najčešće je to tzv. *output gain* funkcija ekvilajzera) na taj način da se nivo zvuka izjednači sa nivoom zvuka netretiranog signala – tek nakon ovoga primena A/B testa dobija pun smisao. Ovo podešavanje ukupnog nivoa tretiranog signala je bitno i zbog ukupne strukture nivoa (*gain structure*) u audio lancu, jer promena nivoa ekvilajzerom tretiranog signala može bitno uticati na rad uređaja koji se nalaze nakon ekvilajzera u audio lancu.

6. Pomenuta referenca u radu sa ekvilajzerima podrazumeva da pre ulaska u proces ekvilizacije imamo manje ili više jasnu ideju šta ekvilizacijom želimo postići. U tom smislu je veoma dobra navika imati pri ruci snimke na kojima se može čuti zvuk pojedinih instrumenata kakvima u trenutnom radu težimo, tzv. referentne snimke, kojima se stalno možemo vraćati kao reperu na osnovu kojeg donosimo odluke.



Slika 75: Izofonske krive – pri nižim nivoima slušanja ljudsko uvo percipira niske i visoke frekvencije subjektivno znatno slabije nego srednje. Pri višim nivoima slušanja ove razlike su znatno manje izražene.

7. Celokupan opseg frekvencija se može grubo podeliti na niske (od 20 Hz do 250 Hz), donje srednje (od 250 Hz do 1 kHz), gornje srednje (od 1 kHz do 4 kHz) i visoke (preko 4kHz) frekvencije. Krajnje uopšteno govoreći, izdizanjem srednjih frekvencija (viših ili nižih, u zavisnosti od instrumenta) dobija se tvrdi, prodorniji ali i suženiji, često se kaže tačkastiji zvuk. Potiskivanjem srednjeg opsega (odnosno naglašavanjem niskog i visokog) dobija se mekši, baršunastiji zvuk, ali se istovremeno gubi na prezentnosti, uz subjektivno smanjenje glasnoće instrumenta u ukupnom miks.

8. U okviru ovih početnih opsega, može se govoriti o podospezima koji na karakterističan način utiču na kvalitet zvuka: opseg od 300-600 Hz često definiše toplinu zvuka, opseg od 800-1200 Hz prodornost i tvrdoću, dok se prisutnost (prezentnost) zvuka često definiše u podopsegu od 2-4 kHz. Svetlina u zvuku se može naglasiti izdizanjem opsega iznad 4 kHz. Na slici 76 i tabeli 8 date su neke od mogućih posledica tretiranja određenih podopsega, koje se mogu uzeti kao početna referenca u radu sa ekvilajzerima.

9. Izdizanje određenih opsega u cilju naglašavanja bitnih karakteristika zvuka ponekad može dovesti do izdizanja uvek prisutnih šumova instrumenta (škripanje žica, zvuk klapni, disanje, zvuk pedala i sl.). Iz tog razloga u procesu slušanja i donošenja odluka treba obraćati pažnju i na moguće narušavanje prirodnosti odnosa zvuka instrumenta i pratećih šumova.

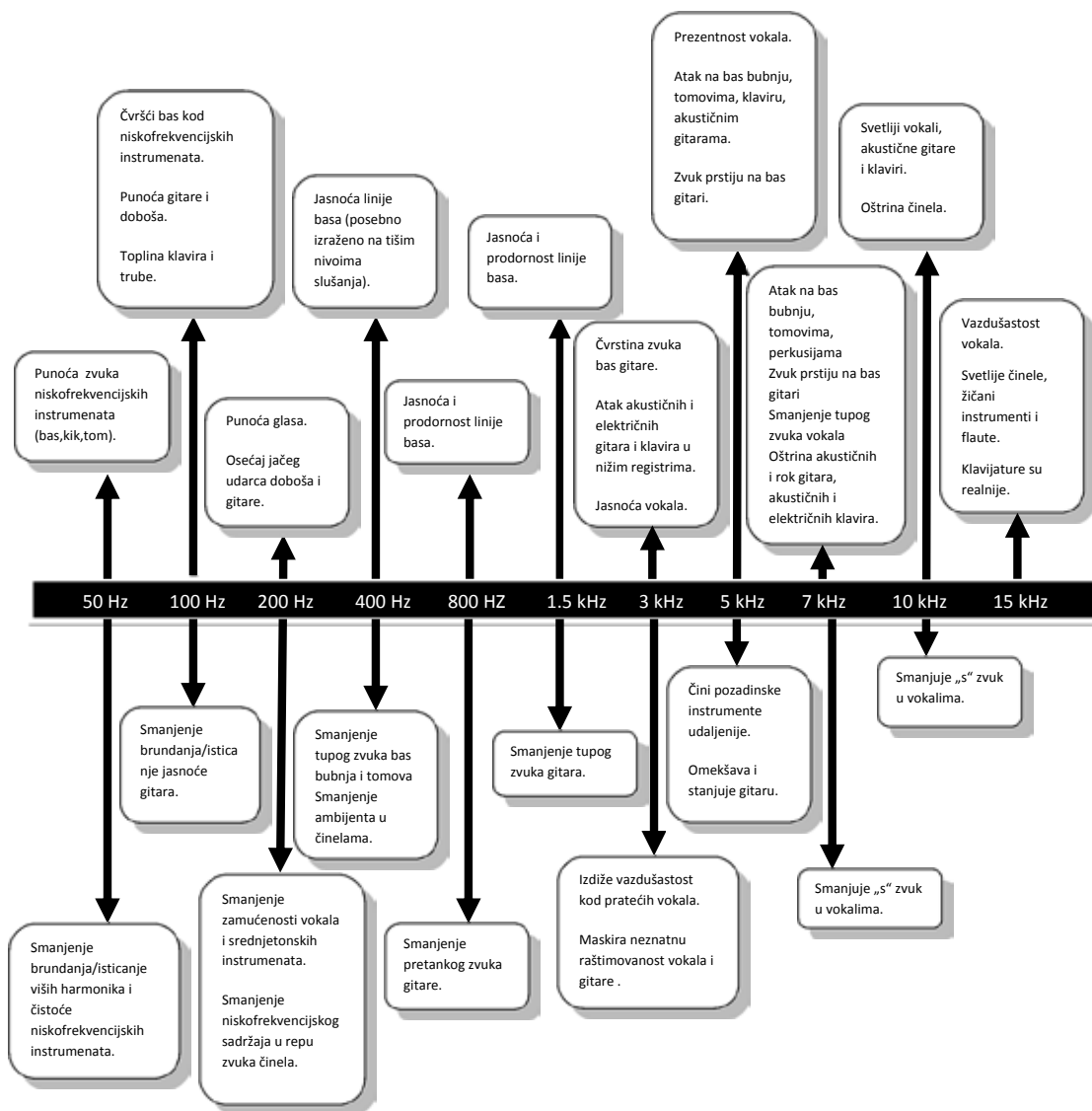
10. Ekvilizacija pojedinačnog instrumenta ima samo donekle smisla, jer konačan rezultat mora biti u potpunosti usaglašen sa potrebama ukupnog miksa. U tom smislu, ekvilizaciju na kanalu u solo modu rada treba često kombinovati sa slušanjem i ekvilizacijom pri slušanju određenih grupa kanala ili miksa u celini.

11. Boja instrumenta koji je sniman sa više mikrofona može drastično (u pozitivnom ili negativnom smislu) biti promenjena izmenom faznog stava signala u nekom od kanala (tzv. obrtanje faze). Ovo ne treba smetnuti sa uma, zato što je ovim prostim postupkom uključivanja ili isključivanja jednog prekidača moguće doći, ako ne do krajnjeg, a ono barem do zvuka od kojeg je znatno bolje krenuti u dalji postupak ekvilizacije.

12. Rezolucija dinamike ljudskog uha je takva da je prosečnom slušaocu praktično nemoguće da primeti promene nivoa koje su manje od 1dB. Ova činjenica direktno zavisi od vrste zvuka i nivoa slušanja, ali se kao generalno polazište može smatrati tačnom. To praktično znači da se sve promene nivoa signala, ili nekog njegovog podopsega, koje su reda veličine 1dB mogu razmatrati više u domenu osećaja nego primetne razlike. 2 dB je promena koju je relativno laki uočiti, dok se promene nivoa od 3 dB smatraju bitnim. Sve promene nivoa koje podrazumevaju upotrebu verdnosti od preko 5-6 dB se mogu smatrati drastičnim, i veoma često ukazuju ili na potrebu producenta da bitno izmeni karakter početnog zvuka. I na ovom mestu nije loše istaći činjenicu da je svakako bolje u fazi snimanja posvetiti veću pažnju pokušaju da se dođe do zvuka koji će po svojim karakteristikama zahtevati blažu ekvilizaciju u fazi miksa, nego ispravljati početni karakter snimljenog zvuka drastičnim intervencijama.

13. Pri radu sa ekvilajzerima treba imati na umu i sliku izofonskih krivih (slika 75), koje ukazuju na način na koje ljudsko uvo reaguje na različite frekvencije pri različitim nivoima slušanja. U poslovima muzičke produkcije ne postoje definisani standardi i preporuke za nivoe kojima se u studijskom radu obavlja slušanje. Iz tog razloga treba biti svestan da viši nivoi slušanja „olakšavaju“ uhu da percipira niske i visoke frekvencije na sličan način kao i srednje, dok slušanje na nižim nivoima za posledicu ima da uvo sve otežanije percipira niski i visoki frekvencijski podopseg. Ovo dovodi do toga da miksevi koji nisu kontrolisani na niskim nivoima slušanja veoma često mogu biti takvi da se pri tihoj reprodukciji niske i visoke frekvencije jednostavno ne čuju, čime se u potpunosti gubi cela koncepcija. S obzirom na činjenicu da nije moguće kontrolisati na kom nivou će muzika biti slušana od strane krajnjih konzumenata, neophodno je vršiti konstantnu proveru frekvencijskog balansa miksa

pri visokim, srednjim i niskim nivoima slušanja, sa ciljem da se konačni miks izbalansira na taj način da se pri svim nivoima slušanja njegove bitne komponente uklapaju i dopunjuju na željeni način.



Slika 76: Očekivani rezultati ekvilizacije pri izdizanju (gornja polovina) i smanjivanju (donja polovina) određenih frekvencijskih podopsega

INSTRUMENT	ŠTA SMANJIVATI?	ZAŠTO SMANJIVATI?	ŠTA IZDIZATI?	ZAŠTO IZDIZATI
Ljudski glas	7 kHz	Sibilance	8 kHz	Big sound
	2 kHz	Shrill	3 kHz i više	Clarity
	1 kHz	Nasal	200-400 Hz	Body
	90 Hz i niže	Popping P's	/	/
Klavir	1-2 kHz	Tinny	5 kHz	More presence
	300 Hz	Boomy	100 Hz	Bottom end
Električna gitara	1-2 kHz	Shrill	3 kHz	Clarity
	90 Hz i niže	Muddy	125 Hz	Bottom end
Akustična gitara	2-3 kHz	Tinny	5 kHz i više	Sparkle
	200 Hz	Boomy	125 kHz	Full
Električni bas	1 kHz	Thin	600 Hz	Growl
	125 Hz	Boomy	90 Hz i niže	Bottom end
Kontrabas	600 Hz	Hollow	2-5 kHz	Sharp attack
	200 Hz	Boomy	125 Hz i niže	Bottom end
Doboš	1 kHz	Annoying	2 kHz	Crisp
			150-200 Hz	Full
			90 Hz	Deep
Bas bubanj	400 Hz	Muddy	2-5 kHz	Sharp attack
	90 Hz i niže	Boomy	60-125 Hz	Bottom end
Timpani	300 Hz	Boomy	2-5 kHz	Sharp attack
			90-200 Hz	Bottom end
Činele	1 kHz	Annoying	7-8 kHz	Sizzle
			8-12 kHz	Brilliance
			15 kHz	Air
Limeni duvački instrumenti	1 kHz	Honky	8-12 kHz	Big sound
	120 Hz i niže	Muddy	2 kHz	Clarity
Žičani instrumenti	3 kHz	Shrill	2 kHz	Clarity
	120 Hz i niže	Muddy	400-600 Hz	Lush and full

Tabela 8: Važniji frekvencijski podopsezi instrumenata koji se koriste u pop-rock muzici i rezultati njihovog tretiranja opisani izvornim terminima na engleskom jeziku

PITANJA ZA PROVERU ZNANJA

1. Koje su osnovne vrste audio filtera?
2. Šta su ekvilajzeri?
3. Koje su osnovne vrste ekvilajzera?
4. Šta je A/B test?
5. Šta je Q faktor?
6. Šta je *notch* filter?

LITERATURA

- [1] John Eargle: Sound Recording, Litton Educational Publishing 1976.
- [2] Grupa autora, Handbook for Sound Engineers, Howard W. Sams&Co., 1987.
- [3] Đorđe Petrović, Skripte za muzičku produkciju, Beograd, 1995.
- [4] Geoff Martin, Towards a Better Understanding of Stereo Microphone Techniques, 1995
- [5] www.soundonsound.com

