

Materijali za predavanja

# **AUDIOTEHNIKA**

za studente preddiplomskog studija

Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu

Sveučilišta u Zagrebu

**Autori**

**Ivan Đurek**

**Hrvoje Domitrović**

**Inačica 2.01**

---

**SADRŽAJ**

1. Mjerne jedinice, signali i izobličenja .....	4
1.1 Mjerne jedinice .....	4
1.2 Signali .....	11
1.3 Izobličenja signala .....	20
2. Osnovni sklopovi audio uređaja.....	36
2.1 Pasivni elementi.....	36
2.2 Aktivni elementi .....	38
2.3 Povratna veza.....	40
2.4 Sklopovi s operacijskim pojačalima .....	41
2.5 Audio transformatori .....	47
2.6 Ulazne i izlazne impedancije .....	49
3. Obrada signala .....	53
3.1 Vremenska obrada signala.....	53
3.2 Frekvencijska obrada signala.....	63
3.3 Dinamička obrada signala.....	74
4. Digitalni sustavi .....	85
4.1 A/D i D/A pretvorba .....	85
4.2 Pohrana podataka.....	94
4.3 Kompresija audio podataka .....	96
5. Miješala.....	98
5.1 Osnovno miješalo .....	98
5.2 Konzola za miješanje.....	99
5.3 Konfiguracija konzola .....	99
5.4 Digitalna miješala .....	105
6. Pojačala snage.....	107
6.1 Osnovne izvedbe pojačala snage .....	107
6.2 Klasa A .....	109
6.3 Klasa B.....	112
6.4 Klase G i H .....	114
6.5 Klasa D .....	115
6.6 Paralelni spoj tranzistora.....	116
6.7 MOSFET-i.....	117
6.8 Termalna dinamika pojačala.....	118
6.9 Napajanje pojačala.....	120

---

7. Mikrofolni i zvučnici .....	121
7.1 Mikrofolni.....	121
7.2 Zvučnici .....	129
8. Struktura audio sustava .....	136
8.1 Struktura pojačanja .....	136
8.2 Snaga pojačala i zvučnika.....	138
8.3 Proračun razglasa.....	139

# 1. Mjerne jedinice, signali i izobličenja

## 1.1 Mjerne jedinice

### 1.1.1 Decibel

U audiotehnici se rabe razne vrste mjernih jedinica. Jedna od najzastupljenijih je "decibel". Ona se rabi u raznim oblicima, tako da može označavati razinu zvučnog tlaka ili odnos amplituda napona. U svakom slučaju mjerna jedinica decibel, koja ima oznaku dB, označava **odnos** između dvije veličine. Razlog zašto se rabi dB je taj što se radi o logaritamskoj veličini, tako da se uz pomoć manjih brojeva mogu prezentirati veći brojevi, koji bi zahtijevali više znamenaka. Također, osjetljivost naših ušiju na glasnoću je "logaritamska", te dB vrijednosti bolje prikazuju kako čujemo nego apsolutne vrijednosti. Dakle, jedinica decibel se rabi kako bi pojednostavila prikaz veličina.

Decibel je zapravo 1/10 jedinice Bel, nazvane po izumitelju Alexanderu Grahamu Bellu. Jedinica Bel je definirana kao logaritamski odnos električkih, akustičkih ili drugih odnosa. Odnos dviju snaga u Belima se može napisati kao:

$$\text{Bel} = \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$$

Jedinica decibel je prikladnija za uporabu u audio sustavima, primarno zbog toga jer je skaliranje brojeva prirodnije. Kako je decibel (dB) 1/10 jedinice Bel, može se matematički prikazati jednadžbom:

$$\text{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (1.1)$$

**Primjer 1.1:** Koliki je odnos u dB, snage  $P_1=2$  W prema  $P_0=1$  W?

$$\begin{aligned} \text{dB} &= 10 \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_0}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{2}{1}\right) = 10 \cdot \log(2) \\ &= 10 \cdot 0,301 \approx 3 \end{aligned}$$

tako da je odnos 2 W prema 1 W u decibelima 3 dB.

**Primjer 1.2:** Koliki je odnos u dB, snage  $P_1=100$  W prema  $P_0=10$  W?

$$\begin{aligned} \text{dB} &= 10 \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_0}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{100}{10}\right) = 10 \cdot \log(10) \\ &= 10 \cdot 1 = 10 \end{aligned}$$

tako da je odnos 100 W prema 10 W u decibelima 10 dB.

Dva prethodna primjera prikazuju interesantnu karakteristiku uporabe dB za prikaz odnosa snaga:

- a) kada je snaga dvostruko veća, ona je veća za 3 dB (ili ako je dva puta manja onda je manja za 3 dB),
- b) kada je snaga deset puta veća, ona je veća za 10 dB (ili ako je deset puta manja onda je manja za 10 dB).

Već se mogu lagano uviđati prednosti uporabe decibela u odnosu na apsolutne vrijednosti. Puno je lakše prikazivati odnose razina u decibelima nego rabiti same razine. To olakšava rad s razinama. Na primjer, ako želimo dva puta povećati snagu audio pojačala za dva puta, nije potrebno znati apsolutnu vrijednost signala u voltima na izlazu pojačala, nego je potrebno potencijometar za namještanje snage toliko okretati dok se na mjerачu snage kazaljka ne pomakne za 3 dB. Ako je prije namještanja kazaljka pokazivala 10 dB, dovoljno ju je pomaknuti da pokazuje 13 dB.

S druge strane, radi preopterećenja pojačala ili zvučnika, trebamo znati koja je referentna vrijednost u odnosu na koju se računaju razine u decibelima, kako ne bi uništili pojačalo ili zvučnik.

Jedinica dB se također može rabiti za prikaz odnosa napona. Odnos napona u decibelima nije jednak odnosu snaga u decibelima. Kako je poznato iz Ohmovog zakona, snaga je proporcionalna kvadratu napona, tako da se odnos snaga može pisati kao:

$$\text{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{U_1^2}{U_0^2}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{U_1}{U_2}\right) \quad (1.2)$$

Dakle, odnos napona u decibelima je duplo veći od odnosa snaga u decibelima. Pogledajmo što to znači. Dvostruki odnos napona odgovara razini od 6 dB. Odnos deset puta većeg napona odgovara razini od 20 dB.

### 1.1.2 Relativne prema apsolutnim vrijednostima

Ključni koncept jedinice dB je u tome da nema apsolutnu vrijednost, nego ona uvijek prikazuje vrijednost u odnosu na neku referentnu vrijednost, dakle radi se o relativnoj jedinici. U prethodnim primjerima, snaga i napon u dB se uvijek računao prema nekoj vrijednosti  $P_0$ , odnosno  $U_0$ . O kojoj se referentnoj vrijednosti radi, ovisi o samom sustavu i veličini koju mjerimo.

Na primjer, razina zvučnog tlaka u dB se mjeri u odnosu na referentnu vrijednost praga čujnosti od 20  $\mu\text{Pa}$ . Na referentnoj vrijednosti razina u dB je uvijek 0 dB. Kod drugih veličina 0 dB će se odnositi na drugu referentnu vrijednost.

**Primjer 1.3:** Iz specifikacija uređaja: maksimalni izlazni napon pretpojačala je +20 dB.

Ova specifikacija nam ništa ne govori o tome koliki je apsolutni maksimalni izlazni napon, jer referentna vrijednost nije specificirana.

**Primjer 1.4:** Iz specifikacija uređaja: maksimalni izlazni napon pretpojačala je +20 dB prema 1 mV.

Ova specifikacija već ima više smisla. Govori nam koja je referentna vrijednost u odnosu na koju se mjeri razina pretpojačala, a to je u ovom primjeru 1 mV. Iz toga je onda lako izračunati maksimalni izlazni napon tog pretpojačala.

$$20 \text{ dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{\max}}{1 \text{ mV}}\right) \rightarrow U_{\max} = 1 \text{ mV} \cdot 10^{\frac{20 \text{ dB}}{20}} = 1 \text{ mV} \cdot 10^1 = 10 \text{ mV}$$

Dakle, jedinica dB nema praktično značenje ako ne znamo referentnu vrijednost u odnosu na koju se računa odnos veličina.

### 1.1.3 dBm i dBu

Kako bi se olakšao rad s mjernom jedinicom dB, u praksi se koriste razne izvedenice ove jedinice. One uz dB nose oznaku koja nam govori koja je njihova referentna vrijednost.

Jedinica **dBm** prikazuje odnos električnih snaga, a njena referentna vrijednost je uvijek **1 mW**. Važno je znati da dBm nije direktno povezana s naponima ili impedancijama.

Električni krug u kojem je prvi put uporabljena ova jedinica je bila 600 ohmska telefonska linija. Pri tome je referentna vrijednost bila 1 mW. U tom slučaju se može izračunati napon te linije, uz tu snagu i taj otpor, a on iznosi 0,775 V<sub>rms</sub>. Zbog toga se kod ove jedinice često radi greška da se kaže da 0 dBm znači napon od 0,775 V<sub>rms</sub>. Ali to je samo slučaj kada je impedancija 600 ohma.

Kod većine audio uređaja radimo s naponskim razinama, tako da nas snaga zanima samo kod izlaznih pojačala koja pokreću zvučnike, a u tom slučaju češće se rabi razina snage u wattima. Jedinica dBm se odnosi na snagu, ali nam ne govori kako se ona odnosi na napon, ako ne znamo impedanciju uređaja koji promatramo. Zbog toga se kod audio uređaja najčešće rabi mjerna jedinica **dBu**.

Jedinica dBu je prikladnija za prikaz vrijednosti ulaznog i izlaznog napona, ali ima drugačiju referentnu vrijednost od jedinice dBm. Veličina dBu nije ovisna o impedanciji, odnosno opterećenju, tako da 0 dBu se uvijek odnosi na referentnu vrijednost od **0,775 V<sub>rms</sub>**.

**Primjer 1.5:** Maksimalni izlazni napon pretpojačala je +20 dBu pri opterećenju od 10 kΩ ili višem.

Ovaj primjer nam govori da je maksimalni izlazni napon pretpojačala 7,75 V<sub>rms</sub>, ali na specificiranom opterećenju. To znači ako se na izlaz pretpojačala spoji drugi uređaj s ulaznim otporom koji je manji od 10 kΩ, doći će do pada napona, te povećanja opterećenja (veća izlazna struja pretpojačala) pretpojačala, što dovodi do povećanja izobličenja ili čak mogućnosti pregaranja.

Kako bi postigli specificirani izlazni napon pojačala, moramo povećati struju kroz izlazni krug jer je ukupni otpor pao. Veća struja od specificirane može dovesti do pregaranja izlaznog stupnja pretpojačala.

### 1.1.4 dBV i dBv

Mjerna jedinica dBu je relativno nova. Prije su se rabile i druge mjerne jedinice koje se još mogu naći u specifikacijama nekih uređaja.

Mnogo godina se rabila mjerna jedinica dBV, gdje je 0 dBV označavalo referencu od 1 V<sub>rms</sub>.

Jedinica dBv je također mjera za naponsku razinu, ali njena referentna vrijednost je 0,775 V, što odgovara mjernoj jedinici dBu, u svim uvjetima.

Prelazak iz mjerne jedinice dBV u dBu je jednostavan, ako se radi o naponima. Dovoljno je vrijednosti u dBV dodati 2,2 dB kako bi prešli u dBu jedinice, i obrnuto.

### 1.1.4 dBW

Osim mjernih jedinica za napon koriste se i mjerne jedinice za prikaz snage u decibelima. Jedna od takvih jedinica je dBW koja se koristi za prikaz odnosa snaga, s referentnom vrijednosti 1 W, a za računanje se koristi jednadžba (1.1). Na primjer, ako je izlazna snaga pojačala 100W, u decibelima bi to iznosilo 20 dBW.

GENERAL SPECIFICATIONS	
Internal processing	32bit (Accumulator=58bit)
Number of scene memories	99
Sampling frequency	Internal: 44.1kHz,48kHz,88.2kHz,96kHz External: Normal rate 44.1kHz(-10%) to 48kHz(+6%) Double rate 88.2kHz(-10%) to 96kHz(+6%)
Signal Delay	≤ 1.6 ms CH INPUT to OMNI OUT (fs=48 kHz) ≤ 0.8 ms CH INPUT to OMNI OUT (fs=96 kHz)
Total harmonic distortion <sup>*1</sup> Input Gain=Min.	CH INPUT to OMNI OUT ≤ 0.05%, 20Hz to 20kHz @+4dBu into 600Ω ≤ 0.01%, 1kHz @+18dBu into 600Ω (@Sampling frequency=44.1/48kHz) ≤ 0.05%, 20Hz to 40kHz @+14dBu into 600Ω ≤ 0.01%, 1kHz @+18dBu into 600Ω (@Sampling frequency=88.2/96kHz)
Frequency response	CH INPUT to OMNI OUT 0.5, -1.5dB 20Hz - 20kHz @+4dBu into 600Ω (@Sampling frequency=44.1/48kHz) 0.5, -1.5dB 20Hz - 40kHz @+4dBu into 600Ω (@Sampling frequency=88.2/96kHz)
Dynamic range (maximum level to noise level)	110dB typ, DA Converter (OMNI OUT) 106dB typ, AD+DA (to OMNI OUT)
Hum & noise level <sup>*2</sup> (20Hz to 20kHz) Rs=150Ω Input Gain=Max Input Pad=0dB Input Sensitivity=-60dB	-128dBu Equivalent Input Noise -86dBu residual output noise, OMNI OUT STEREO OUT off -86dBu(90dB S/N), OMNI OUT STEREO fader at nominal level and all CH INPUT faders -64dBu(68dB S/N), OMNI OUT Master fader at nominal level and one CH INPUT fader
Crosstalk(@1kHz) Input GAIN=min	80dB adjacent input channels (CH1-16) 80dB input to output
Power requirements	Japan: AC100V 50/60Hz, 135W North America: AC120V, 60Hz, 135W Other Areas: AC220-240V, 50/60Hz, 135W
Dimensions (W x H x D)	DM1000: 436 x 200 x 585 mm (17.1" x 7.8" x 23.0") With MB and SP: 486 x 295 x 635 mm (19.1" x 11.6" x 25.0")
Weight	20.0kg (75lbs)

<sup>\*1</sup> Total Harmonic Distortion are measured with a 6dB/octave filter @80kHz  
<sup>\*2</sup> Hum&Noise are measured with 6dB/octave filter @12.7kHz, equivalent to a 20kHz filter with infinite dB/octave attenuation.

ANALOG INPUT / OUTPUT SPECIFICATIONS								
Input Terminal	Pad	Gain	Actual Load Impedance	For Use With Nominal	Input Level			Connector
					Sensitivity <sup>*1</sup>	Nominal	Max. before Clip	
CH INPUT 1-16	0	-60dB	3kΩ	50-600ohm Mics & 600ohm Lines	-70dBu	-60dBu	-40dBu	XLR3-31 type <sup>*2</sup> (Balanced)
	20	-16dB			-26dBu	-16dBu	+4dBu	
OMNI IN 1-4			10kΩ	600ohm Lines	+4dBu	+4dBu	+24dBu	

<sup>\*0</sup> dBu=0.775 Vrms.  
<sup>\*1</sup> dBV=1.00 Vrms.  
<sup>\*2</sup> +48V DC(phantom power) is supplied to CH INPUT(1-24) XLR type connector via each individual switch.  
<sup>\*1</sup> Sensitivity is the lowest level that will produce an output of +4 dB (1.23 V) or the nominal output level when the unit is set to maximum gain. (All faders and level controls are maximum position.)  
<sup>\*2</sup> XLR-3-31 type connectors are balanced (1=GND, 2=HOT, 3=COLD).  
• In these specifications, 0 dBu = 0.775 Vrms.  
• All input AD converters (INPUT 1-16, OMNI INPUT 1-4, TALKBACK) are 24-bit linear, 128-times oversampling. (@fs=44.1, 48 kHz)  
• +48 V DC (phantom power) is supplied to CH INPUT (1-16) XLR type connectors via individual switches.

Output Terminal	Actual Source Impedance	For Use With Nominal	Gain SW	Output Level		Connector
				Nominal	Max. before Clip	
OMNI OUT 1-12	150Ω	600kΩ Lines	-	+4dBu	+24dBu	XLR3-32 type <sup>*1</sup> (Balanced)
PHONES	100Ω	8Ω Lines	-	4mW	25mW	ST Phone jack <sup>*2</sup> (Unbalanced)
		40Ω Lines	-	12mW	75mW	

<sup>\*0</sup> dBu=0.775 Vrms.  
<sup>\*1</sup> dBV=1.00 Vrms.  
<sup>\*1</sup> XLR-3-32 type connectors are balanced (1=GND, 2=HOT, 3=COLD).  
<sup>\*2</sup> PHONES stereo phone jack is unbalanced (Tip=LEFT, Ring=RIGHT, Sleeve=GND).  
• In these specifications, 0 dBu = 0.775 Vrms, 0 dBV=1.00 Vrms.  
• All output DA converters (OMNI OUT 1-12, PHONES) are 24-bit, 128-times oversampling. (@fs=44.1, 48 kHz)

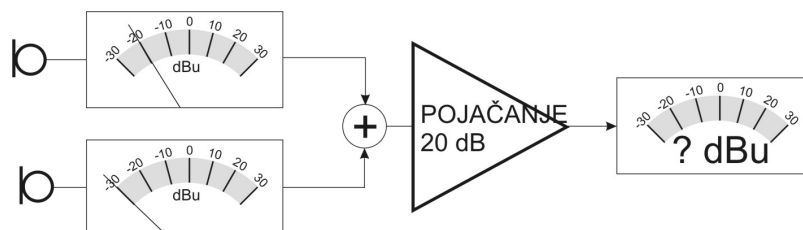
**Slika 1.1.** Primjer specifikacija stola za miješanje (Yamaha DM1000V2)

Na slici 1.1 je prikazan primjer specifikacija stola za miješanje. Treba obratiti pažnju na nominalne i maksimalne vrijednosti ulaznih i izlaznih razina u ovisnosti o impedancijama, izvora signala odnosno opterećenja.

## Riješeni zadaci

### Zadatak 1.1

Na slici 1.2 prikazana je shema sklopa s ugrađenim mjeračima razine signala. Signali iz dva mikrofona se zbrajaju i zbrojeni se pojačavaju. Kolika će biti razina signala na izlazu pojačala?



Slika 1.2

Prilikom rješavanja zadatka sa decibelima treba biti oprezan, jer se vrijednosti u decibelima ne zbrajaju kao apsolutne vrijednosti u voltima ili wattima. Da bi zbrojili vrijednosti u dB treba ih prvo pretvoriti u apsolutne vrijednosti. Kako se radi o operacijama s naponima, koristiti ćemo jednadžbu za računanje razine napona u decibelima (jednadžba 1.2). U ovom slučaju naponi se računaju u dBu, što znači da je referentna vrijednost  $0,775V_{rms}$ .

$$\text{Izlazni napon prvog mikrofona: } U_1 = 0,775 V \cdot 10^{\frac{-20dBu}{20}} = 0,775 V \cdot 10^{-1} = 0,0775 V_{rms}$$

$$\text{Izlazni napon drugog mikrofona: } U_2 = 0,775 V \cdot 10^{\frac{-30dBu}{20}} = 0,775 V \cdot 10^{-1,5} = 0,0245 V_{rms}$$

Dva signala se zbrajaju u miješalu, pa će rezultata zbrajanja biti  $U_3 = U_1 + U_2 = 0,102 V_{rms}$ .

Nakon miješala, zbrojeni signal ulazi u pojačalo. Izlazni signal se može izračunati na dva načina.

a) Prvi način je da se zbrojeni signal  $U_3$  pretvori u svoju vrijednost u dBu.

$$U_3 [dBu] = 20 \cdot \log \left( \frac{0,102 V_{rms}}{0,775 V_{rms}} \right) = 20 \cdot (-0,881) = -17,6 \text{ dBu}$$

Veličina signala na izlazu pojačala se dobije tako da se pojačanje u apsolutnim vrijednostima pomnoži s apsolutnom vrijednosti pojačanja. Iz matematike je poznato da se množenje pod logaritmom svodi na zbrajanje logaritama:  $\log(a \cdot b) = \log(a) + \log(b)$ . Zbog toga se množenje apsolutne vrijednosti s pojačanjem svodi na zbrajanje logaritama, odnosno vrijednosti u decibelima, pa će izlazni napon, a time i konačno rješenje biti:

$$U_{izl} = U_3 [dBu] + A [dB] = -17,6 + 20 = 2,4 \text{ dBu}$$



- b) Drugi način je da se napon  $U_3$  u voltima prvo pomnoži s apsolutnim pojačanjem, a nakon toga dobiveni napon pretvori u dBu jedinice. Kako decibeli prikazuju odnos dviju veličina, tako i pojačanje u dB jedinica prikazuje odnos izlaznog prema ulaznom signalu, bez obzira o kojim se apsolutnim jedinicama radi. Apsolutno pojačanje pojačala će prema jednadžbi (1.2) biti:

$$\frac{U_{izl}}{U_3} = 10^{\frac{20 \text{ dB}}{20}} = 10^1 = 10$$

Prema tome izlazni napon u  $V_{rms}$  će biti  $U_{izl} = U_3 \cdot 10 = 0,102 V_{rms} \cdot 10 = 1,02 V_{rms}$ .

Da bi dobili vrijednost izlaznog napona u dBu ponovo se koristimo jednadžbom (1.2) s time da nam je referentna vrijednost  $0,775 V_{rms}$ :

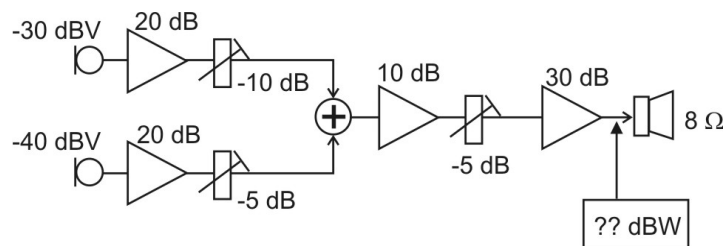
$$U_{izl} [dBu] = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{izl} [V_{rms}]}{0,775}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{1,02}{0,775}\right) = 2,4 \text{ dBu}$$

Oba načina rješavanja su ekvivalentna i daju jednaki rezultat. Važno je zapamtiti da se vrijednosti u decibelima ne mogu zbrajati kao apsolutne vrijednosti u voltima, a da se množenje s pojačanjem svodi na zbrajanje vrijednosti u decibelima.

Uočite da kada je pojačanje izraženo u decibelima, vrijednost pojačanja se pribraja razini signala u decibelima bez obzira o kojoj se referentnoj vrijednosti radi (dBu, dBV, ...), ali rezultat mora biti prikaza s istom mjernom jedinicom.

### Zadatak 1.2

Na slici 1.3 je prikazan put signala od dva mikrofona do zvučnika. Izračunati električku snagu na zvučniku u dBW jedinicama.



Slika 1.3

Slično kao i u prošlom zadatku prvo ćemo izračunati razine signala koje se zbrajaju u miješalu. Kao što je rečeno, množenje apsolutnih jedinica se svodi na zbrajanje u decibelima. Prema tome razina prvog signala, nakon pojačala i regulatora razine će iznositi:

$$U_1 = -30 \text{ dBV} + 20 \text{ dB} - 10 \text{ dB} = -20 \text{ dBV}$$

Za razinu drugog signala:

$$U_2 = -40 \text{ dBV} + 20 \text{ dB} - 5 \text{ dB} = -25 \text{ dBV}$$

Kako bi pravilno zbrojili razine signala moramo ih prebaciti u apsolutne jedinice:

$$U_1 = 1 \text{ V} \cdot 10^{\frac{-20 \text{ dBV}}{20}} = 10^{-1} = 0,1 \text{ V}_{rms}$$

$$U_2 = 1 \text{ V} \cdot 10^{\frac{-25 \text{ dBV}}{20}} = 10^{-1,25} = 0,056 \text{ V}_{rms}$$

Razina signala nakon miješala će biti:  $U_3 = U_1 + U_2 = 0,156 \text{ V}_{rms}$

Nakon miješala postoji još nekoliko razina pojačanja. Kako su pojačanja prikazana u decibelima, lakše je izlazni signal izračunati tako da napon  $U_3$  prebacimo u decibele:

$$U_3 = 20 \cdot \log\left(\frac{0,156 \text{ V}_{rms}}{1 \text{ V}_{rms}}\right) = -16,1 \text{ dBV}$$

Razina signala na izlazu pojačala, a na zvučniku će biti:

$$U_{izl} = U_3 + 10 \text{ dB} - 5 \text{ dB} + 30 \text{ dB} = 18,9 \text{ dBV}$$

Kako bi izračunali snagu na zvučniku u wattima, potrebno je izlazni signal pretvoriti u razinu u voltima:

$$U_{izl} = 1 \text{ V} \cdot 10^{\frac{18,9}{20}} = 8,8 \text{ V}_{rms}$$

Efektivnu snagu na zvučniku ćemo izračunati prema jednadžbi:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{8,8^2}{8} = 9,7 \text{ W}, \text{ odnosno u dBW to iznosi } P = 10 \cdot \log\left(\frac{9,7 \text{ W}}{1 \text{ W}}\right) = 9,9 \text{ dBW}$$

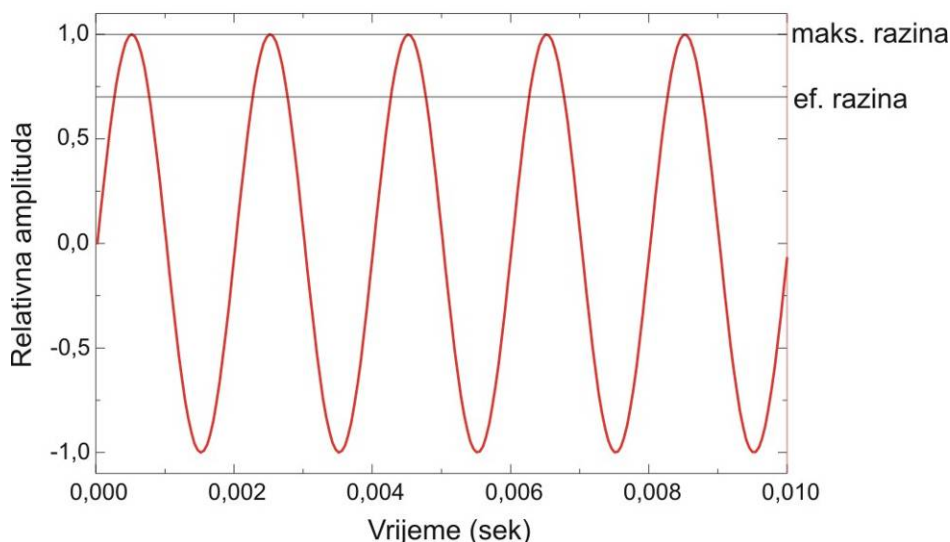
## 1.2 Signali

Audiotehnika se u osnovi bavi obradom signala. Signal koji izađe iz mikrofona ulazi u miješalo, gdje se miješa s drugim signalima. Dodaju mu se efekti, obrađuje se dinamički, vremenski i amplitudno. Nakon toga se šalje u uređaje za snimanje signala ili pojačala snage signala. Da bi se dobro razumio rad audio sustava, potrebno je znati neke osnovne karakteristike i značajke audio signala.

### 1.2.1 Efektivna vrijednost (RMS)

Efektivna vrijednost signala je korisna u izražavanju energije jednostavnih sinusnih i kompleksnih audio signala. To nije maksimalna vrijednost, niti prosječna vrijednost, nego vrijednost koja se dobiva kvadriranjem svih trenutnih napona uzduž signala, te izračunom dobivene prosječne vrijednosti i vađenjem drugog korijena tog broja. Za periodični signal, kakav je sinusni, efektivna vrijednost se može dobiti jednostavnim dijeljenjem maksimalne vrijednosti s konstantom. Međutim, kod aperiodičnog signala, kakvi su glazba ili govor, efektivna vrijednost se može jedino mjeriti s posebnim instrumentom. Efektivna vrijednost sinusnog signala je  $0,707$  ( $1/\sqrt{2}$ ) vrijednosti maksimalne razine.

Što se tiče efektivne snage kod audio pojačala snage, efektivna vrijednost signala je u korelaciji sa snagom koju bi disipirao istosmjerni signal (DC). Na primjer, uzmimo u obzir pojačalo s nazivnom snagom od  $200 W_{ef}$  koja se isporučuje opterećenju, odnosno zvučniku s nazivnom impedancijom od  $8 \Omega$ . Takvo pojačalo će isporučivati  $40 V_{ef}$  opterećenju od  $8 \Omega$ . Dakle istosmjerni napon od  $40 V$  će disipirati jednaku snagu na opterećenju od  $8 \Omega$  kao i sinusni signal efektivne razine od  $40 V$ .



**Slika 1.2** Maksimalna i efektivna razina sinusnog signala.

Efektivna vrijednost nam puno više govori o trenutnoj razini signala od srednjoj vrijednosti. Na srednju vrijednost malo utječu nagle promjene signala. Osim toga efektivna vrijednost bolje odgovara našoj percepciji glasnoće. Zbog toga mnogi uređaji za obradu signala, kompresori, sustavi za smanjenje šuma i slični krugovi posjeduju detektor efektivne vrijednosti signala.

Efektivna vrijednost periodičnog signala s periodom  $T$  se može izračunati prema jednadžbi:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt}$$

**Primjer 1.6:** Treba izračunati efektivnu razinu sinusnog signala amplitude  $A$  i perioda  $T$ .

$$U_{ef}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T (A \cdot \sin(\omega t))^2 dt = \frac{A^2}{T} \int_0^T \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\omega t) \right) dt = \frac{A^2}{T} \cdot \frac{1}{2} \cdot T = \frac{A^2}{2}$$

$$U_{ef} = \frac{A}{\sqrt{2}}$$

### 1.2.2 Frekvencijska domena

Analiza i obrada signala u audiotehnici se često obavlja u frekvencijskoj domeni. Zbog toga je važno biti dobro upoznat s Fourierovom analizom signala, jer je ona temelj obrade i analize u frekvencijskoj domeni.

Fourierova analiza nam govori da se svaki periodični signal može rastaviti na zbroj sinusnih i kosinusnih signala. To znači da je svaki kompleksni signal zapravo zbroj sinusnih i kosinusnih signala koji se razlikuju po amplitudi i fazi.

Fourierov niz, odnosno zbor sinusnih i kosinusnih signala se može predstaviti slijedećom jednakosti. Ako su  $a_0, a_1, \dots$  i  $b_0, b_1, \dots$  realni ili kompleksni brojevi, takozvani Fourierovi koeficijenti, može se napisati:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx)]$$

Ako se radi o periodičnom signalu u intervalu  $[-\pi, \pi]$ , Fourierovi koeficijenti su:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx$$

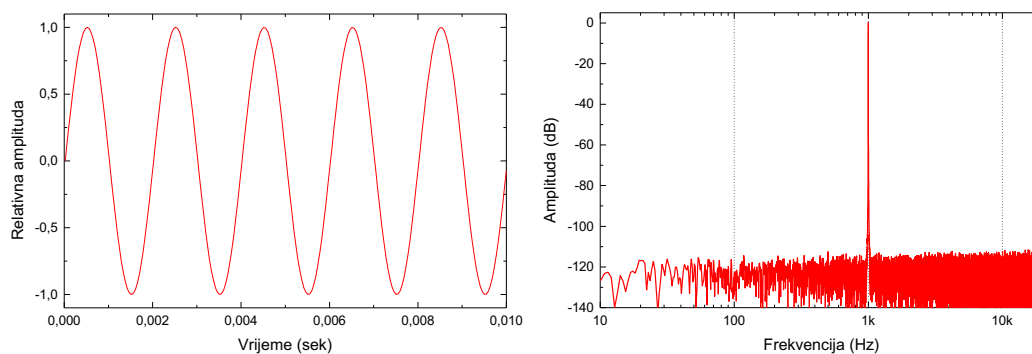
Na primjer, uzmimo periodični sinusni signal. U tom slučaju će Fourierovi koeficijenti biti:

$$a_n = 0 \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

$$b_1 = 1; \quad b_n = 0 \quad n = 2, 3, \dots$$

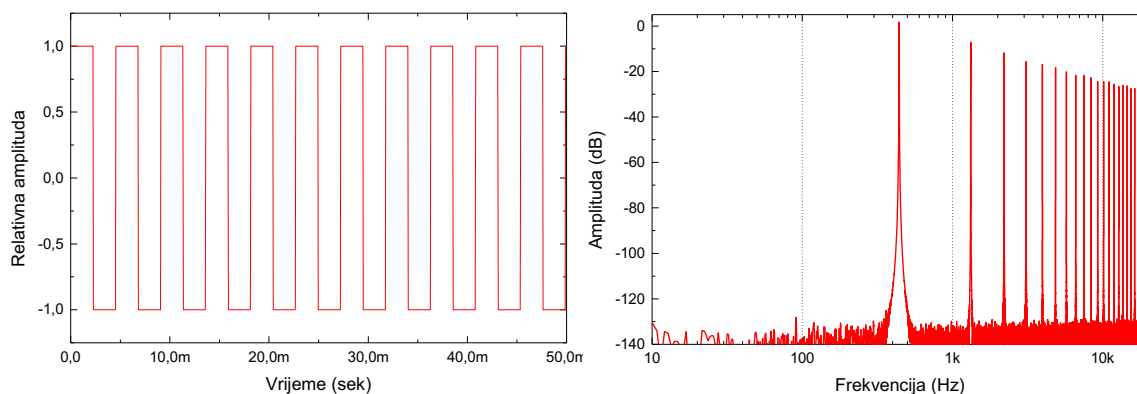
Vidi se da se Fourierov niz u slučaju sinusnog signala sastoji samo od sinusne komponente. Dakle, periodični sinusni signal u vremenskoj domeni je u frekvencijskoj domeni predstavljen jednom linijom na frekvenciji tog sinusnog signala.

Na slici 1.3 prikazan je sinusni signal frekvencije 1 kHz u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.



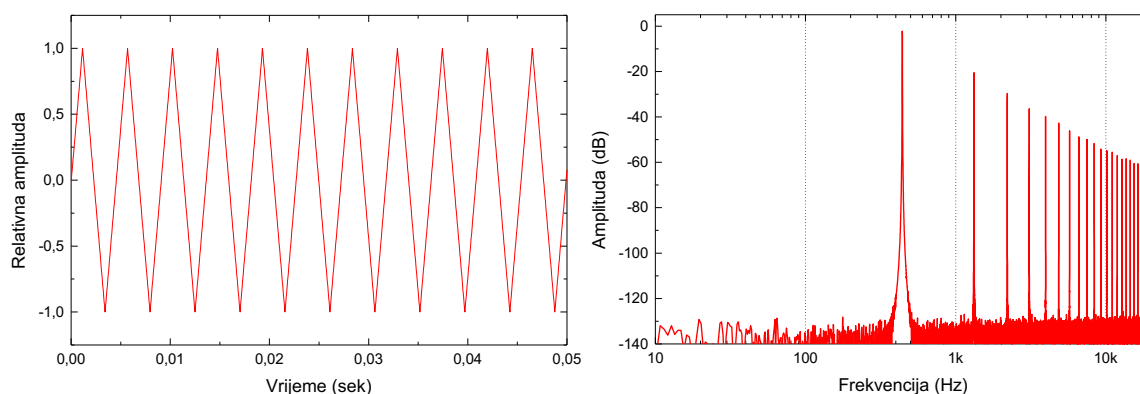
**Slika 1.3** Sinusni signal u vremenskoj i frekvencijskoj domeni ( $f=1$  kHz).

U slučaju periodičnog pravokutnog signala, koji se sastoji od dvije razine, svi Fourierovi koeficijenti će biti različiti od nule, tako da će njegov spektar (frekvencijska domena) biti bogat, odnosno pun sinusnih i kosinusnih komponenata. Slika 1.4 prikazuje pravokutni signal u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.



**Slika 1.4** Pravokutni signal u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.

Jednako vrijedi za trokutasti signal, kod kojega su Fourierovi koeficijenti također različiti od nule. Slika 1.5 prikazuje trokutasti signal u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.



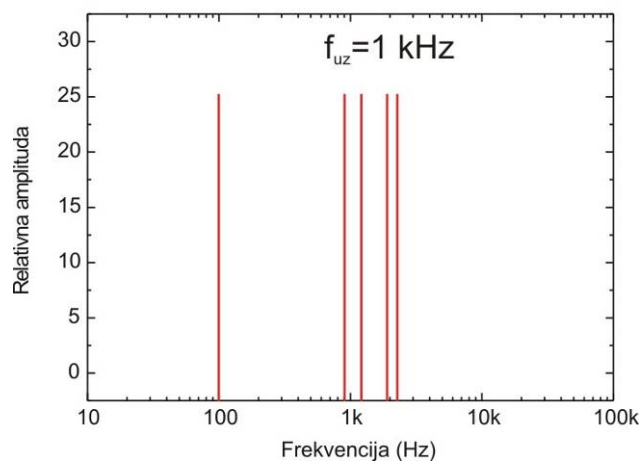
**Slika 1.5** Trokutasti signal u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.

Dosadašnja razmatranja su se odnosila na kontinuirani signal. Međutim, velika većina današnjih uređaja za obradu signala radi s digitalnim signalima. U tom slučaju se rabi takozvana diskretna Fourierova analiza.

Ako je  $x[n]$  diskretni niz realnih ili kompleksnih brojeva ( $n$  – cijeli broj) diskretna vremenska Fourierova transformacija (DTFT) se obično piše kao:

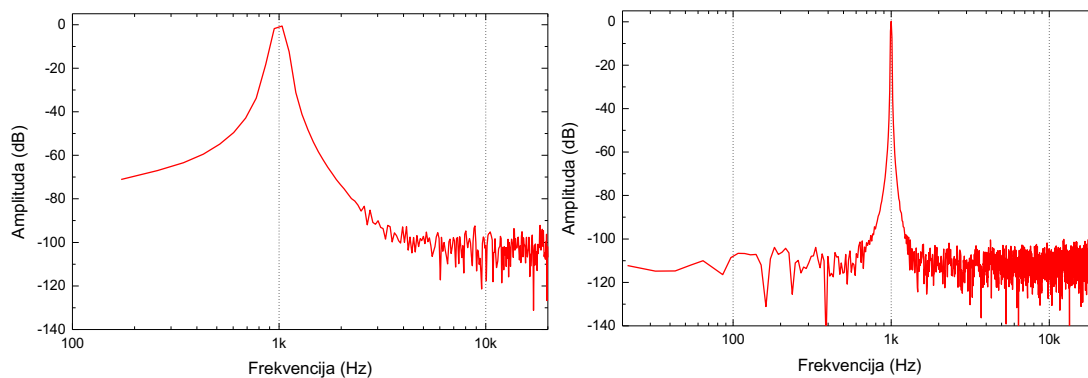
$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-i\omega n} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n][\cos(\omega n) - i \cdot \sin(\omega n)]$$

Vrijednosti  $x[n]$  su uzorci kontinuiranog signala, uzorkovani u diskretnim vremenskim trenucima  $t=nT$ , gdje je  $T$  interval uzorkovanja. Iz toga ispada da je DTFT također periodična funkcija s periodom frekvencije uzorkovanja signala  $f_{uz}=1/T$ . Slika 1.6 prikazuje periodičnost DTFT.



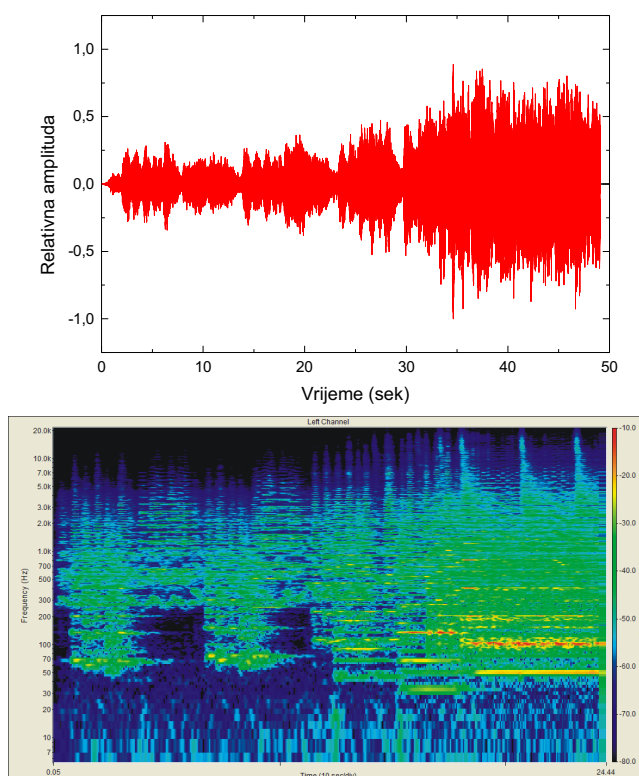
**Slika 1.6** Periodičnost DTFT.

Do sada smo spominjali periodične signale, ali nismo ništa govorili o njihovom trajanju. U praksi se rabe signali ograničenog trajanja, koji ne moraju biti periodični. Da bi se napravila Fourierova analiza takvih signala, oni se moraju na prikladan način "izrezati" na dijelove. To znači da za Fourierovu analizu imamo ograničeni broj uzoraka signala. Broj uzoraka nam određuje rezoluciju spektra, odnosno Fourierove analize. Što je broj uzoraka signala veći, to će se spektar moći prikazati u manjim koracima  $\Delta f$ . To znači da se širina frekvencijskoj pojasa signala dijeli na onoliko dijelova koliko imamo uzoraka signala. Slika 1.7 prikazuje isti sinusni signal s različitim dužinama. U prvom slučaju se radi o signalu dugačkog 512 uzoraka, a u drugom 4096 uzoraka. Kako nam broj uzoraka određuje rezoluciju spektra, tako se i njihovi spektri razlikuju. Vidljivo je da se uz veći broj uzoraka, može dobiti spektar bolje frekvencijske rezolucije.



**Slika 1.7** Spektar signala iste frekvencije ali različite dužine trajanja. Prvi je dugačak 512 uzoraka, a drugi 4096 uzoraka.

Iz ovoga je vidljivo da je za analizu potreban dovoljan broj uzoraka. Ti se problemi rješavaju na razne načine, ali ovaj dokument ne pokriva taj dio. Samo ćemo spomenuti da se za vremensko-frekvencijsku analizu često rabi wavelet metoda. Rezultat wavelet metode je takozvani spektrogram signala. Na x-osi se nalazi vrijeme, na y-osi frekvencija, a intenzitet boje označava razinu signala. Na slici 1.8 je prikazan signal audio signal u vremenskoj domeni i njegov spektrogram.

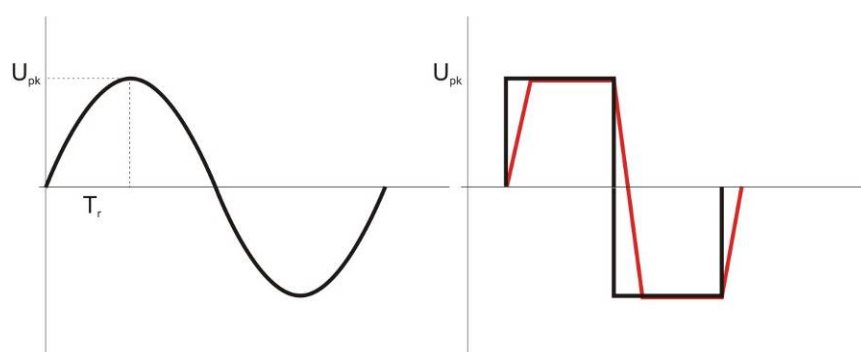


**Slika 1.8** Spektrogram audio signala.

### 1.2.3 Druge karakteristike signala

#### BRZINA PORASTA

Brzina porasta određuje brzinu promjene signala, a povezana je s vremenom porasta, odnosno *slew rate* faktorom kod audio uređaja. Ako brzina porasta prijeđe brzinu porasta audio uređaja može doći do pojave takozvanih tranzijentnih izobličenja. Na neki način brzina porasta nam određuje kolika je gornja granična frekvencija signala. S druge strane brzina porasta audio uređaja nam govori kolika je njegova gornja granična frekvencija, odnosno kakav je odziv visokih frekvencija. Visoke frekvencije određuju brzinu porasta signala, odnosno oštre rubove signala, kao što je to slučaj kod pravokutnog signala. Ako je brzina porasta audio uređaja manja od brzine porasta signala, doći će do izobličenja. Slika 1.9 prikazuje brzinu porasta kod sinusnog i pravokutnog signala i izobličeni pravokutni signal.

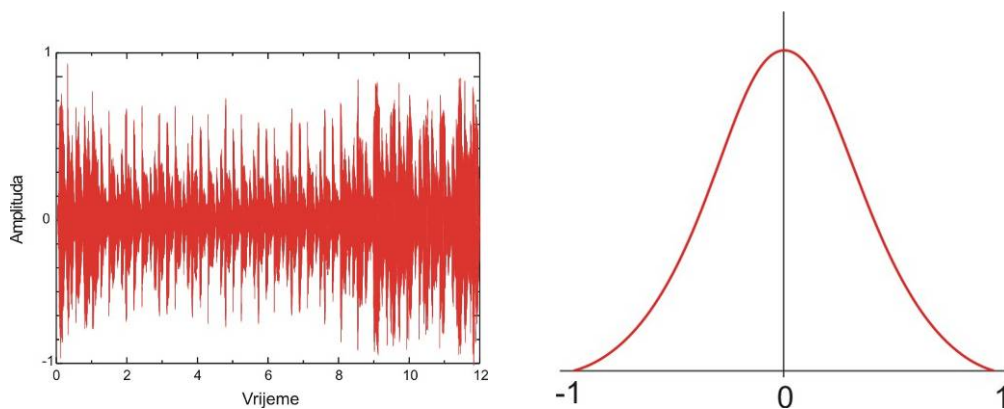


Slika 1.9 Brzina porasta signala.

#### GUSTOĆA RASPODJELE AMPLITUDA

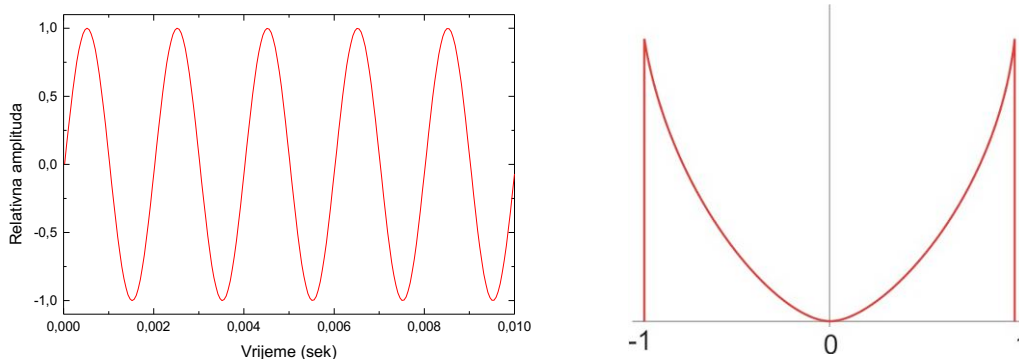
Realni glazbeni i govorni signali su karakterizirani promjenama amplitude signala, koje je teško predvidjeti. Na primjer pjevač na pozornici se u nekom trenutku može zaderati u mikrofon, što je nepredvidivo. Dakle moramo računati s većom dinamikom, odnosno uzeti dovoljno veliku dinamičku rezervu. U predviđanju amplituda signala nam može pomoći gustoća raspodjele amplituda. Ova raspodjela nam prikazuje učestalost pojavljivanja određene razine amplituda. Prikazuje se dijagramom raspodjele amplituda. Glazbeni i govorni, dakle realni signali imaju zvonoliku raspodjelu amplituda, koja je prikazana na slici 1.10. To znači da su kod govora i glazbe najučestalije niže amplitude, a one visoke se rijetko pojavljuju.



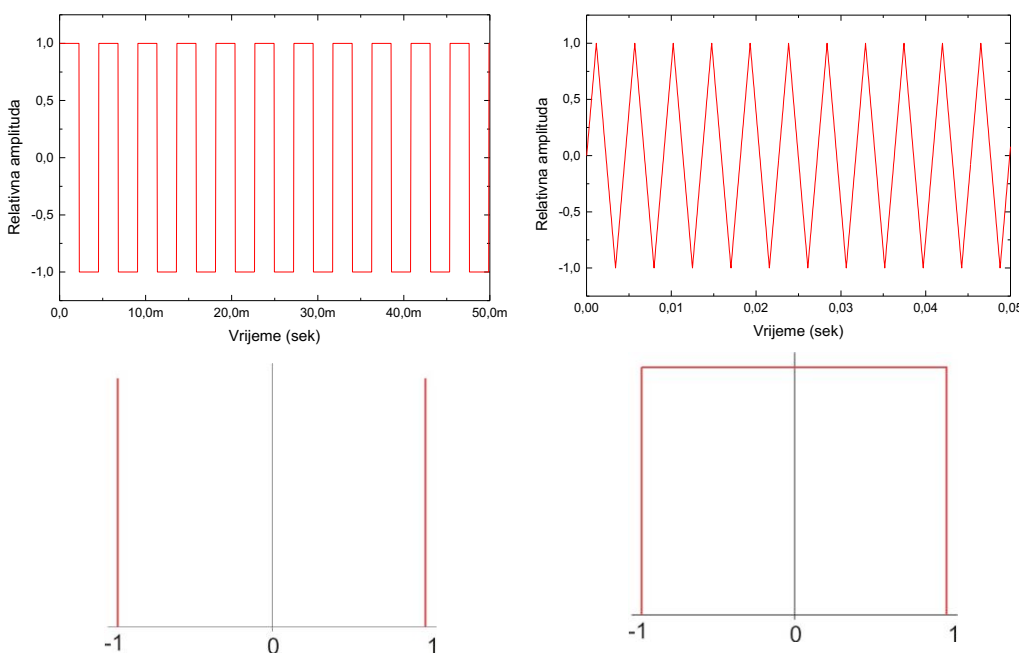


**Slika 1.10** Gustoća raspodjele amplituda glazbenog signala.

Slika 1.11 prikazuje gustoću raspodjele amplituda za sinusni signal, a slika 1.12 za pravokutni i trokutasti signal.



**Slika 1.11** Gustoća raspodjele amplituda sinusnog signala



**Slika 1.12** Gustoća raspodjele amplituda pravokutnog i trokutastog signala.

## VRŠNI FAKTOR

Vršni faktor (*crest factor*) je veličina koja nam govori koliki je odnos između maksimalne i efektivne razine signala. Ovaj faktor je također važan za proračun dinamike uređaja, ali i kod mjerenja izobličenja. Ako imamo mjerni uređaj koji reagira na efektivnu vrijednost signala, kod većih razina može doći do izobličenja, odnosno rezanja signala, ako u obzir nismo uzeli vršni faktor signala. Vršni faktor nam zapravo govori koliko imamo rezerve signala iznad efektivne vrijednosti. Vršni faktor sinusnog signala iznosi 1,41. Vršni faktor govora i glazbe je od 4 do 5.

## SPEKTRALNA GUSTOĆA SNAGE

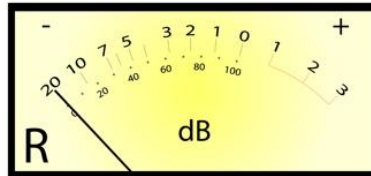
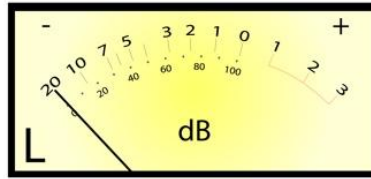
Funkcija koja nam pokazuje raspodjelu snage signala u ovisnosti o frekvenciji je takozvana spektralna gustoća snage. Ona nam govori koliki je udio pojedine frekvencije ili frekvencijskog raspona u ukupnoj snazi signala. To je dosta korisno znati kod konstrukcije zvučnika, jer možemo procijeniti koliki dio snage se odnosi na niskotonski, srednjetonski i visokotonski zvučnik. Kod većine govornih i glazbenih signala, spektralna gustoća snage opada s frekvencijom.

## UREĐAJI ZA MJERENJE RAZINE SIGNALA AUDIO UREĐAJA

Kako bi točno znali o kakvim se razinama radi, ne možemo se do kraja osloniti na naš sluh. Sluh je relativan pojam i dosta se mijenja od osobe do osobe. Zbog toga je potrebno rabiti određene mjerne uređaje, odnosno pokazivače koji će nam pokazati kakva je razina signala. U tu svrhu se najčešće rabe dvije vrste pokazivača: VU metri i PPM (peak) metri.

VU metar je instrument, pokazivač koji mjeri efektivnu razinu signala. Njegovo vrijeme reakcije i vrijeme otpuštanja su relativno visoki i kreću se oko 300 ms. Zbog toga ovaj uređaj teško može pratiti promjene brzih, tranzijentnih signala. S druge strane efektivna razina dobro odgovara osjećaju glasnoće koji mi čujemo.

PPM (peak) metar je instrument koji mjeri vršne vrijednosti signala. To mu je omogućeno jer ima kratko vrijeme reakcije i vrijeme otpuštanja. On nam omogućuje detekciju maksimalnih razina signala, tako da možemo odrediti koje su nam gornje granice.



**Slika 1.13** VU metar



**Slika 1.14** PPM (Peak Program Meter) metar.

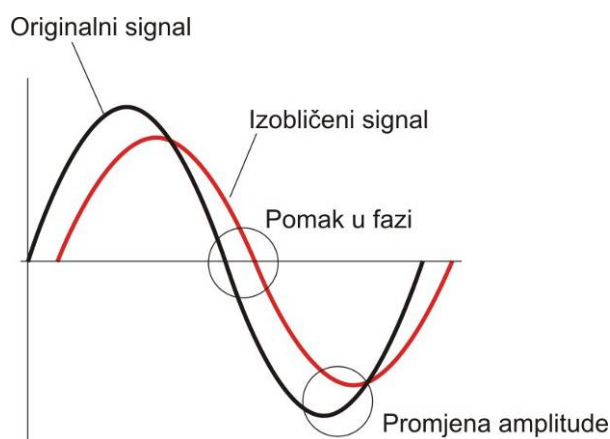
## 1.3 Izobličenja signala

Jedan od glavnih zadataka audiotehnike, koja se bavi obradom, prijenosom, snimanjem i reprodukcijom signala je prijenos audio informacije sa što manje izobličenja. To znači da ono što mikروفon zabilježi, a prenese se kroz razne stupnjeve obrade i pojačanja do zvučnika, treba prenijeti sa što manje promjena.

Svaka neželjena promjena signala predstavlja izobličenja. Izobličenja mogu biti razna, a u osnovi se dijele na linearna i nelinearna, odnosno na ona izobličenja koja ne generiraju nove spektralne komponente i na ona koja ih generiraju. Općenito gledajući sve ono što se pojavi na izlazu audio sustava, a ne nalazi se u originalnom signalu predstavlja smetnju odnosno izobličenja. Pa prema tome u tu skupinu upada i šum, koji je sastavni dio svih audio uređaja i ne može se izbjeći.

### 1.3.1 Linearna izobličenja

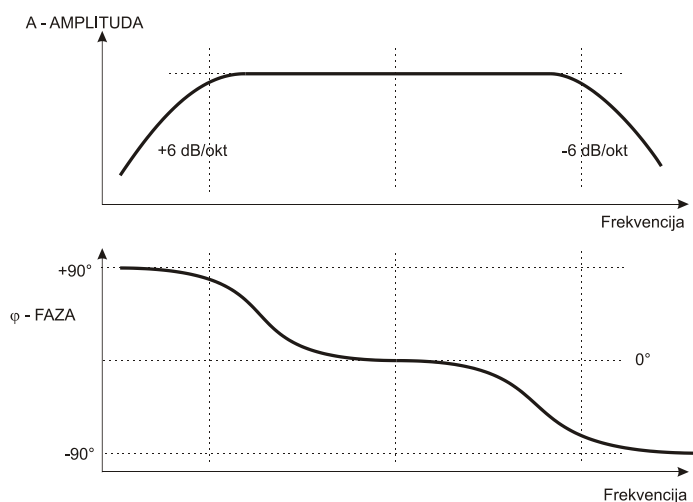
Linearna izobličenja su ona koja ne generiraju nove spektralne komponente, nego na izlazu iz određenog uređaja dolazi do neželjene promjene amplitude i faze signala u odnosu na ulazni signal. To znači da ako se na ulazu pretpojačala pojavi čisti sinusni signal, na izlazu se neće pojaviti njegovi harmonici, nego će doći do promjene amplitude i do kašnjenja signala u odnosu na ulazni signal. Na slici 1.13 prikazana je jedna takva promjena. Vidljivo je da je izobličenom signalu promijenjena samo amplituda i da kasni za ulaznim signalom.



**Slika 1.13** Amplitudna i fazna izobličenja

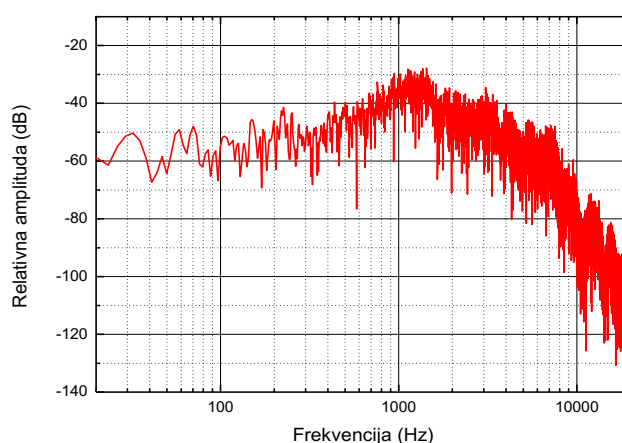
Uzroci amplitudnih i faznih izobličenja su raznoliki, a kod audio uređaja se najčešće pojavljuju zbog reaktivnih komponenata, induktiviteta i kapaciteta. Poznato je da struja i napon kroz reaktivne komponente nisu u fazi, nego su pomaknute za određeni stupanj, odnosno vremenski pomak. Na primjer na ulazu pojačala snage se nalazi serijski spojeni kondenzator koji služi za odvajanje istosmjerne komponente koja bi se mogla pojaviti na ulazu. Dakle, taj serijski kondenzator u kombinaciji s ulaznim otporom služi kao visokopropusni filter. S druge strane, gornja granična frekvencija pojačala snage mora biti ograničena, kako bi se izbjegle moguće oscilacije na visokim frekvencijama. U tu svrhu se također rabi kondenzator koji prigušuje visoko-frekvencijske komponente. Tipična prijenosna karakteristika pojačala snage u ovisnosti o frekvenciji je prikazana na slici 1.14. Kada govorimo o prijenosnoj karakteristici mislimo na onu karakteristiku koja prikazuje odnos izlaznog prema ulaznom signalu, odnosno u slučaju amplitudne karakteristike radi

se o karakteristici pojačanja signala, a u slučaju fazne karakteristike o karakteristici kašnjenja signala. Vidljivo je da pojačanje i pomak u fazi signala ovise o frekvenciji signala. Treba uočiti da se pomaci u fazi događaju upravo u području porasta odnosno pada pojačanja signala.



**Slika 1.14.** Amplitudna i fazna prijenosna karakteristika pojačala snage.

Ekstreman slučaj amplitudnih izobličenja možemo naći kod zvučnika. Zvučnik je kompleksan sustav kod kojeg se teško postiže linearna prijenosna karakteristika zvučnog tlaka u ovisnosti o frekvenciji. Slika 1.15 prikazuje frekventijsku karakteristiku zvučnika, kod koje su vidljive velike promjene amplitude emitiranog zvučnog tlaka. Naravno, postavlja se pitanje koliko su čujne te promjene signala, odnosno koliko velike promjene amplitude signala su dozvoljene da ih ljudsko uho ne primijeti. O tome će biti riječi kasnije.



**Slika 1.15** Frekventijska karakteristika zvučnika.

Fazna izobličenja možemo analizirati iz kompleksne prijenosne karakteristike nekog sustava, koja se može predočiti s jednakosti:

$$H(\omega) = |H(\omega)| \cdot e^{j\Phi(\omega)}$$

Ako se radi o linearnom sustavu koji samo kasni signal za vrijeme  $T$ , prijenosna funkcija se može napisati kao:

$$H(\omega) = K \cdot e^{-j\omega T}$$

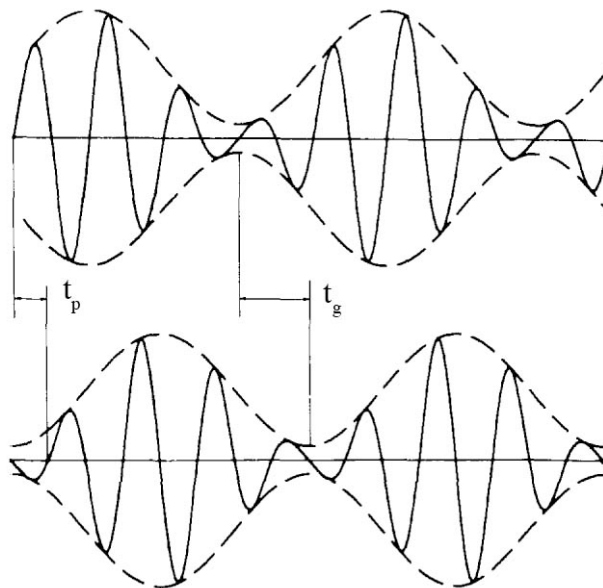
Da bi sustav bio linearan, odnosno ne bi unosio amplitudna i fazna izobličenja, koeficijent  $K$  mora biti konstantan, te faza mora opadati s frekvencijom  $\Phi(\omega) = -\omega T$ . Ako postoje odstupanja od ovih pretpostavki, dolazi do spomenutih amplitudnih izobličenja i do faznih izobličenja uzrokovanih vremenom kašnjenja signala kroz sustav.

Ovom pomaku u fazi odgovaraju dvije veličine koje ovise o frekvenciji, fazno kašnjenje  $t_p$  i grupno kašnjenje  $t_g$ . Ova kašnjenja su definirana kako slijedi:

$$t_p(\omega) = -\frac{\phi(\omega)}{\omega}$$

$$t_g(\omega) = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega}$$

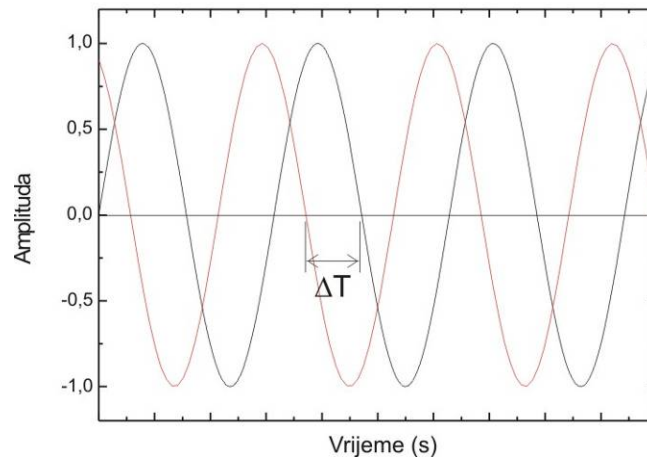
Slika 1.16 prikazuje razliku između faznog i grupnog kašnjenja signala.



**Slika 1.16** Fazno i grupno kašnjenje signala.

Ako tražimo da sustav nema faznih izobličenja zbog kašnjenja signala, iz gornjih jednadžbi proizlazi da fazno i grupno kašnjenje moraju biti jednako nekom vremenu  $T > 0$ .

Fazna izobličenja se mogu pojaviti i zbog same prijenosne karakteristike sustava, zbog već spomenutih reaktivnih komponenata. Takav fazni pomak također ovisi o frekvenciji i u idealnom slučaju bi trebao biti konstantan. Primjer takvog faznog pomaka je prikazan na slici 1.14. Slika 1.17 prikazuje primjer kašnjenja izlaznog signala prema ulaznom.



**Slika 1.17** Primjer vremenskog kašnjenja između izlaznog (crveni) i ulaznog signala (crni).

Da bi se dobio pomak u fazi, vremenski pomak se mora prebaciti u stupnjeve, odnosno radijane. Ako znamo frekvenciju signala, a time i njegov period, iz očitanoog vremenskog pomaka možemo izračunati pomak u fazi prema slijedećoj jednakosti:

$$\varphi = 2\pi \cdot \frac{\Delta T}{T} = 2\pi f \cdot \Delta T = \omega \cdot \Delta T$$

Ako se u obzir uzmu sva moguća fazna izobličenja, odnosno fazni pomaci, ukupni fazni pomak se može napisati kao:

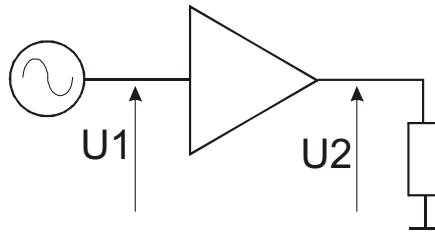
$$\varphi = -\omega T + \varphi_a(\omega) + \varphi_0$$

Gdje su  $-\omega T$  fazni pomak zbog kašnjenja signala,  $\varphi(\omega)$  fazni pomak zbog prijenosne karakteristike i  $\varphi_0$  neki konstantni fazni pomak.

### 1.3.1.1 Mjerenje linearnih izobličenja

#### SINUSNI SIGNAL

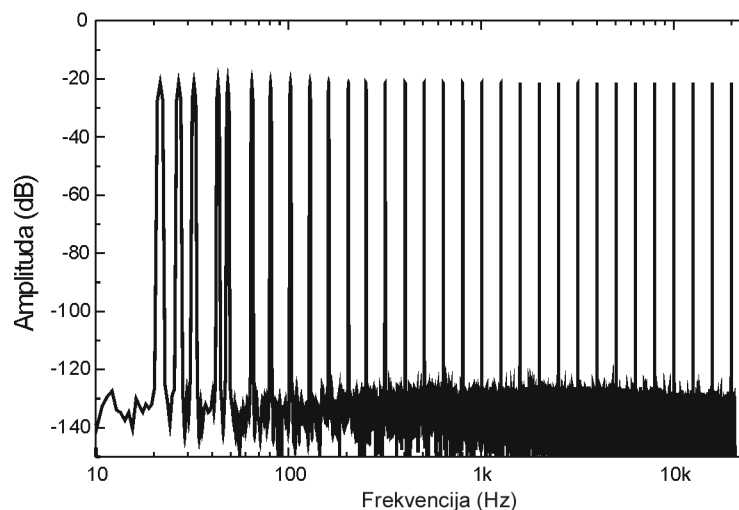
Mjerenje amplitudne frekvencijske karakteristike najčešće se provodi sa sinusnim signalom. Na ulazu sustava dovede se sinusni signali različitih frekvencija i jednake amplitude. Na izlazu audio uređaja ili sustava se mjeri amplituda signala na jednakim frekvencijama. Prednosti ove ispitne metode su jednostavnost nastajanja ispitnog signala i ponovljivosti mjerenja. Osim toga, kod mjerenja amplitude izlaznog signala ne mjeri se amplituda šuma i komponenti nastalih zbog nelinearnih izobličenja.



**Slika 1.18** Shema mjerenja linearnih izobličenja

## MULTITONSKI SIGNAL

Drugi način mjerenja amplitudne frekvencijske karakteristike pomoću sinusnih signala je uporaba multitonskih signala. Radi se o signalima koji se sastoje od niza sinusnih tonova čije su frekvencije raspodijeljene po frekvencijskom području rada. Usporedbom amplituda frekvencijskih komponenti ulaznog i izlaznog signala može se dobiti amplitudna frekvencijska karakteristika audio uređaja. Što je broj komponenti u spektru veći to je i frekvencijska rezolucija veća. To znači da je mjerenje amplitudne frekvencijske karakteristike biti preciznije, jer su koraci među frekvencijskim komponentama manji. Prednost ovih signala je u tome što su sličniji prirodnim signalima, jer im je raspodjela amplituda zvonolikog oblika, odnosno slična Gaussovoj raspodjeli. Osim toga, postupak mjerenja je relativno brz. S druge strane radi se opet o statičkim signalima, koji nisu pseudoslučajni. Spektar jednog multitonskog signala prikazan je na slici 1.19.



**Slika 1.19** Spektar multitonskog signala.

### 1.3.2 Nelinearna izobličenja

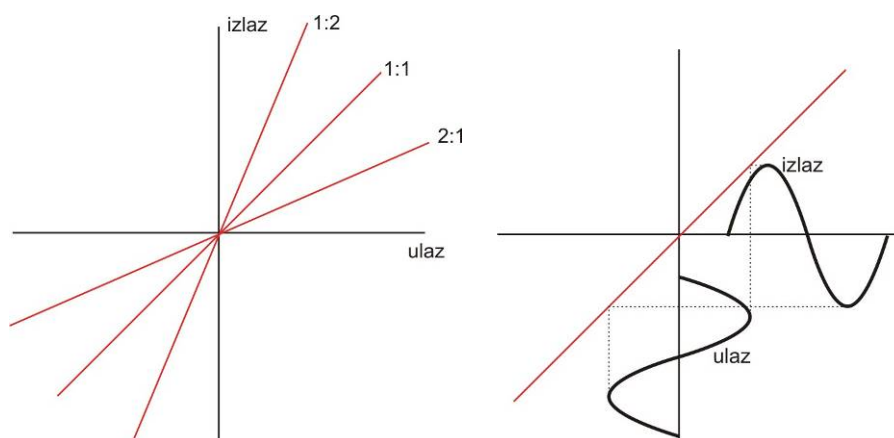
Nelinearna izobličenja su ona izobličenja, koja osim promjene amplitude i faze signala generiraju nove spektralne komponente. Prema vrsti spektralnih komponenti, ova izobličenja se dijele na harmonička i neharmonička.

Harmonička izobličenja su ona izobličenja koja će generirati samo harmonike osnovnog signala. Na primjer, ako se kroz nelinearni sustav propusti sinusni signal frekvencije 1 kHz, na izlazu će se pojaviti njegovi harmonici: 2 kHz, 3 kHz,...



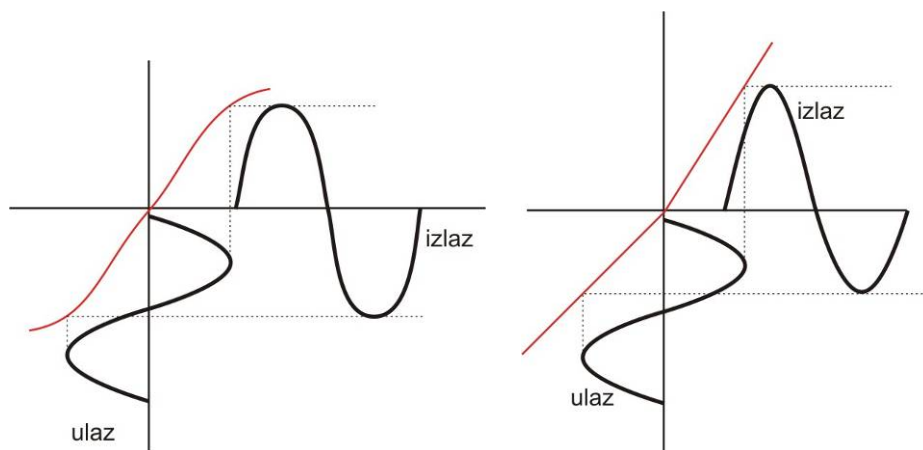
Kod neharmoničkih izobličenja, osim harmonika se pojavljuju i druge spektralne komponente koje su kombinacija (zbroj ili razlika) spektralnih komponenta originalnog ulaznog signala.

Nelinearna izobličenja nastaju zbog nelinearnih prijenosnih karakteristika između izlaznog i ulaznog signala. Primjer linearne prijenosne karakteristike je prikazan na slici 1.20. Kod takvih prijenosnih karakteristika izlazni signal se dobije jednostavnim množenjem ulaznog signala s nekom konstantom  $U_{izl}=K \cdot U_{ul}$ . To znači da će svaka razina, odnosno amplituda biti pojačana za jednaki koeficijent  $K$ .



**Slika 1.20** Linearna prijenosna karakteristika.

Nelinearne prijenosne karakteristike su one kod kojih pojačanje signala ovisi o amplitudi ili predznaku amplitude. Dva primjera nelinearnih prijenosnih karakteristika su dana na slici 1.21.



**Slika 1.21** Nelinearne prijenosne karakteristike

## HARMONIČKA IZOBLIČENJA

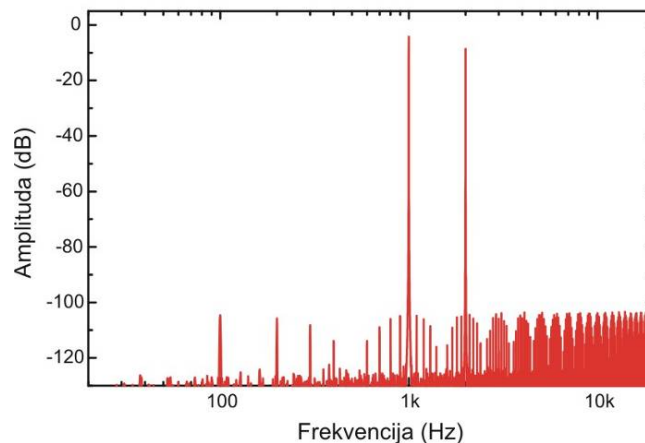
Pogledajmo što će se dogoditi kada prijenosna karakteristika nije linearna, nego ima oblik polinoma:

$$U_{izl} = a_1 U_{ul} + a_2 U_{ul}^2 + a_3 U_{ul}^3 + a_4 U_{ul}^4 + \dots$$

Na primjer uzmimo da je prijenosna karakteristika nekog sustava predstavljena polinomom drugog reda. Ako je ulazni signal sinusnog oblika  $U_{ul} = U_0 \sin(\omega t)$ , tada za izlazni signal dobivamo:

$$U_{izl} = U_{ul} + U_{ul}^2 = a_1 U_0 \sin(\omega t) + a_2 U_0^2 \sin^2(\omega t) = a_1 U_0 \sin(\omega t) + a_2 U_0^2 \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\omega t) \right)$$

Uočava se pojava frekvencije  $2\omega t$ , odnosno prvog harmonika osnovne frekvencije  $\omega$ . Ako to pogledamo u spektralnom dijagramu, pojaviti će se dodatna spektralna linija na frekvenciji koja je dvostruko veća od osnovne frekvencije, kako je prikazano na slici 1.22.



**Slika 1.22** Harmonička izobličenja.

### 1.3.2.1 Mjerenje harmoničkih izobličenja

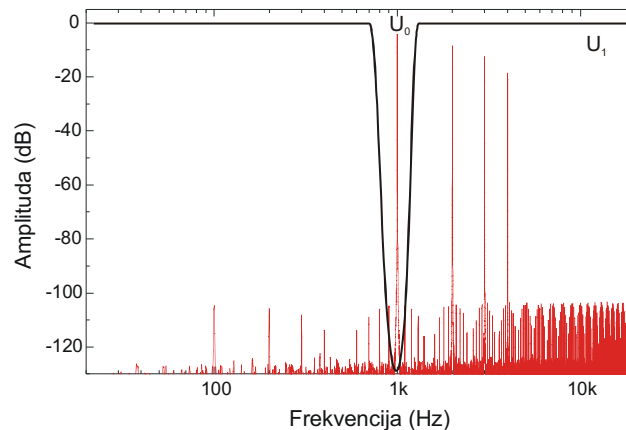
Mjerenjem razine harmonika i osnovnog harmonika i njihovom usporedbom, može se izračunati koeficijent ukupnih harmoničkih izobličenja, koji nam služi kao jedna od mjera kvalitete audio uređaja. Ako se očitaju efektivne vrijednosti razine pojedinih komponenata, jednadžba za faktor ukupnih harmoničkih izobličenja (Total Harmonic Distortion) glasi:

$$THD = \frac{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}}{\sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}} \cdot 100\%$$

Za ovaj način mjerenja je potreban dobar spektralni analizator, koji može točno izmjeriti razinu svake spektralne komponente. U slučaju da ne postoji takav spektralni analizator rabi se druga metoda mjerenja. Kod ove metode se osnovni signal prvo filtrira pomoću pojase brane (*notch* filter), te se pomoću voltmetra izmjeri efektivna razina preostalog signala, a koji uključuje sve harmonike, ali i šum. Nakon toga se izmjeri efektivna razina kompletnog signala, uključujući i osnovni harmonik. U tom slučaju se mjeri faktor harmoničkih izobličenja zajedno sa šumom. Jednadžba u tom slučaju glasi:

$$THD + N = \frac{U_{ef}}{U_{ukef}} \cdot 100\%$$

Na slici 1.23 prikazan je princip mjerenje THD+N faktora izobličenja.



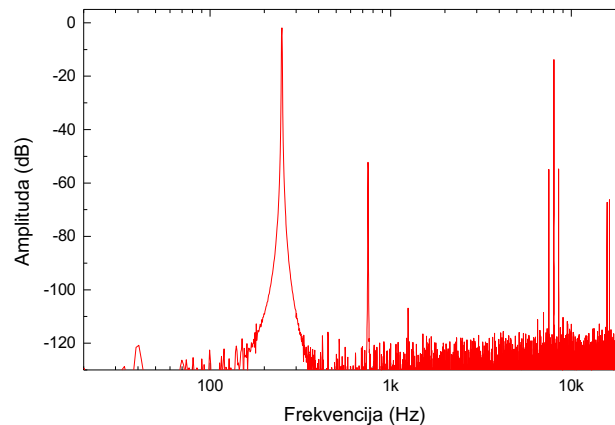
**Slika 1.23** Metoda mjerenje THD+N faktora izobličenja

## NEHARMONIČKA IZOBLIČENJA

Ako kroz sustav propustimo signal koji se sastoji od dva ili više sinusnih signala, što je i najčešće slučaj kod kompleksnih audio signala govora i glazbe, tada će se osim harmonika signala pojaviti i druge komponente, koje mogu biti zbroj ili razlika osnovnih signala. Ova izobličenja se zovu neharmonička izobličenja. Za primjer uzmimo jednaki audio sustav, čija se prijenosna karakteristika može opisati s polinomom drugog reda. Ako je ulazni signal zbroj dva sinusna signala frekvencija  $f_1$  i  $f_2$ , tada će izlazni signal imati slijedeći oblik:

$$\begin{aligned}
 U_{izl} &= U_{ul} + U_{ul}^2 = U_0 [\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)] + U_0^2 [\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)]^2 \\
 &= U_0 [\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)] + U_0^2 [\sin^2(\omega_1 t) + 2 \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) + \sin^2(\omega_2 t)] \\
 &= U_0 [\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)] \\
 &\quad + U_0^2 \left[ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\omega_1 t) - \cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\omega_2 t) \right]
 \end{aligned}$$

Kao što se može vidjeti pojavile su se dvije nove komponente, koje odgovaraju zbroju i razlici osnovnih frekvencija. To se može zorno prikazati ako napravimo Fourierovu analizu ovog signala, odnosno prikažemo njegov spektar, kao na slici 1.24. Vidljiva je pojava osnovnih harmonika obje frekvencije, komponenti koje odgovaraju zbroju i razlici ove dvije frekvencije, a nalaze se oko gornje frekvencije osnovnog signala. U ovom slučaju kao da je gornja frekvencija modulirana donjom frekvencijom, pa se ova izobličenja često nazivaju i intermodulacijska izobličenja.



**Slika 1.24** Neharmonička izobličenja.

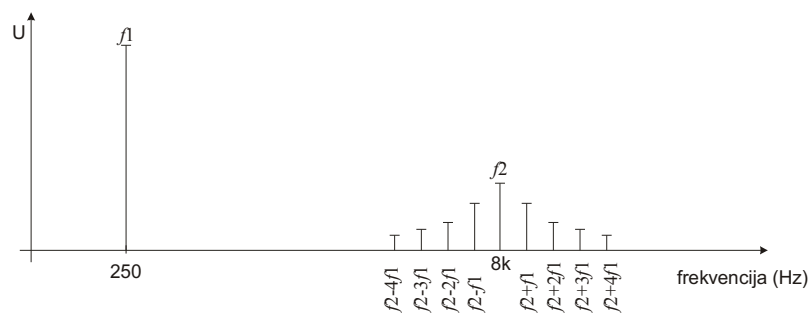
### 1.3.2.2 Mjerenje neharmoničkih izobličenja

Mjerenje intermodulacijskih izobličenja audio pojačala izvodi se tako da se uređaj koji se ispituje pobuđuje s dva sinusna signala, iz dva ton generatora. Jedan sinusni napon je s nižom frekvencijom ( $f_1$ ) i većom amplitudom ( $U_{f1}$ ), a drugi s višom frekvencijom i manjom amplitudom ( $U_{f2}$ ). Po DIN normi, frekvencije signala su  $f_1 = 250$  Hz i  $f_2 = 8$  kHz, s odnosom amplituda  $U_{f1}:U_{f2} = 4:1$ . Ukoliko mjereni sustav sadrži nelinearne elemente, u izlaznom signalu će se pojaviti produkti intermodulacije, koji su prikazani na slici 1.25.

Pobudni naponi iz ton generatora moraju imati točno određene vrijednosti, da ne dođe do prepobude pojačala. Ako je  $U_{pnaz}$  vršne vrijednosti nazivnog ulaznog napona pojačala, onda vršne vrijednosti pobudnih napona  $U_{pf1}$  i  $U_{pf2}$  moraju biti sljedećih odnosa:

$$U_{pnaz} = U_{pf1} + U_{pf2}, \quad U_{pf1} = 4 \cdot U_{pf2}$$

Ton generator 1, s mjernom frekvencijom  $f_1$  ugodi se tako da pojačalo postigne 80% svog nazivnog izlaznog napona. Tada se ton generator 2, s mjernom frekvencijom  $f_2$ , ugodi na četvrtinu vrijednosti pobudnog napona ton generatora 1, pa se izvede mjerenje IM izobličenja.



**Slika 1.25** Spektralne komponente kod intermodulacijska izobličenja dva signala s odnosom amplituda 4:1 (po DIN-u).

Na izlazu pojačala na selektivnom voltmetru se očitaju naponi osnovnog vala više frekvencije ( $U_{f2}$ ) i produkta miješanja ( $U_{f1 \pm f2}$ ). Pomoću izmjerenih efektivnih razina napona može se izraziti faktor intermodulacije:

$$m = \frac{\sqrt{(U_{f_2+f_1} + U_{f_2-f_1})^2 + (U_{f_2+2f_1} + U_{f_2-2f_1})^2 + (U_{f_2+3f_1} + U_{f_2-3f_1})^2 + \dots}}{U_{f_2}} \cdot 100\%$$

Osim opisane metode mjerenja intermodulacijskih izobličenja po DIN-u, primjenjuju su i dvije metode po SMPTE standardu (engl. *SMPTE - Society of Motion Picture and Television Engineers*).

1. Prva metoda po SMPTE-u je ista kao i po DIN-u, samo su mjerne frekvencije pobudnih signala  $f_1 = 60$  Hz i  $f_2 = 7$  kHz.
2. Druga metoda po SMPTE-u je različita po mjernom procesu. U ovom slučaju se iz podataka o amplitudno moduliranom i demoduliranom valu nosiocu više frekvencije izračunava IM izobličenje, koje zapravo predstavlja dubine modulacije signala. Mjerenje se izvodi pri nazivnoj izlaznoj amplitudi, sa frekvencijama pobudnih signala  $f_1 = 1$  kHz i  $f_2 = 10$  kHz, odnosa amplituda  $U_{f_1} : U_{f_2} = 4 : 1$ .

Mjerenja IM izobličenja razlika frekvencija izvodi se po CCIF standardu (engl. *CCIF - International Telephonic Consultative Committee*) prema shemi na slici 2.9. Ispitni signal sastoji se od dva sinusna signala jednake amplitude, s bliskim frekvencijama (na primjer  $f_1 = 14$  kHz i  $f_2 = 15$  kHz). Zbroj napona pobudnih signala mora biti jednak nazivnom ulaznom naponu, da bi se mjerenje izvelo pri nazivnom izlaznom naponu.

Pobudne frekvencije uzimaju se tako da budu ispod gornje granične frekvencije audio uređaja, ali ne smiju biti preblizu, da razlika njihovih frekvencija ( $f_2 - f_1$ ) ne padne ispod donje granične frekvencije. Ova mjerenja su vrlo korisna za procjenu nelinearnosti u gornjem dijelu frekvencijske karakteristike pojačala, gdje harmonička analiza i mjerenje IM izobličenja ne daju objektivne rezultate.

Selektivnim voltmetrom mjere se diskretni naponi pojedinih produkata intermodulacije, mjereći samo one IM komponente čije su frekvencije niže od frekvencije osnovnih tonova, to su (prema slici 2.8):  $a = (U_{f_2} - U_{f_1})$ ,  $b = (2U_{f_1} - U_{f_2})$ ,  $c = 2(U_{f_2} - U_{f_1})$ ,  $d = (3U_{f_1} - U_{f_2})$ , itd.

S obzirom na ove podatke faktor intermodulacije razlika frekvencija je:

$$m_r = \frac{a + b + c + d + \dots}{U_{f_1} + U_{f_2}} \cdot 100\%$$

### 1.3.3 Tranzijentna izobličenja

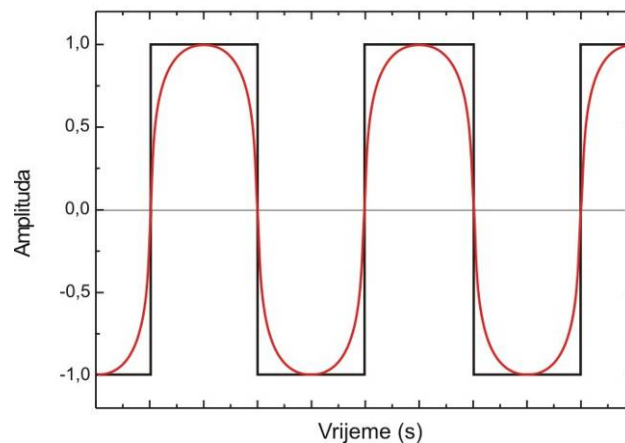
Tranzijentna izobličenja su posebna vrsta izobličenja, iako se može reći da sadrže karakteristike linearnih i nelinearnih izobličenja. Tranzijentna izobličenja se, kako ime kaže, povezuju s promjenom signala. Poznato je da govor i glazba nisu statični signali, nego se njihova amplituda i frekvencija stalno mijenjaju. U jednom trenutku glazba može biti tiha, a u drugom glasna. Te promjene između tih i glasnih dijelova mogu biti brze, a mogu biti spore. Promjene amplitude mogu biti male, ali mogu biti i velike, sve ovisi o vrsti glazbe.

Ako se radi o malim ali brzim promjenama amplitude, govorimo o režimu rada s malim signalima. Kada uređaj radi s relativno malim razinama signala, obično radi u linearnom području prijenosne karakteristike. Današnji audio uređaji počinju generirati veća izobličenja tek kod viših razina signala, tako da kada rade s malim razinama signala

rade u linearnom području. U tom slučaju nema generiranja novih komponenata, nego se pojavljuju samo linearna izobličenja, dakle promjene amplitude i faze.

U području rada s malim signalima, tranzijentna izobličenja su okarakterizirana vremenom porasta signala, koje je pak ograničeno gornjom graničnom frekvencijom samog audio uređaja.

Iz prethodne analize signala, naučili smo da oštre bridove signala i nagle, brze promjene signala čine visoke frekvencije, što se može uočiti ako se napravi Fourierova analiza signala. Dakle, ako audio uređaj ima gornju graničnu frekvenciju nižu od najviše frekvencije audio signala, onda će doći do filtriranja signala, odnosno "rezanja" visokih frekvencija signala. To znači da izlazni signal neće odgovarati ulaznom signalu. Primjer jednog takvog izobličenja je dan na slici 1.26.



**Slika 1.26** Primjer tranzijentnog izobličenja u režimu rada s malim signalima.

Prema tome vrijeme porasta signala  $T_r$  određuje gornju graničnu frekvenciju audio uređaja, prema jednakosti:

$$f_g = \text{širina prijenosnog pojasa} = \frac{0,35}{T_r (\mu s)} \cdot 10^6 \quad (\text{Hz})$$

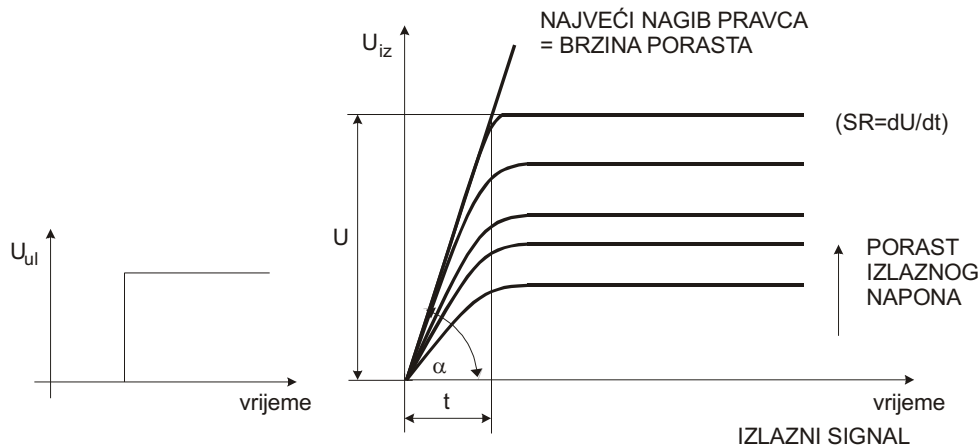
Iz toga proizlazi da što je frekventijsko područje audio uređaja šire, to će moći bolje prenijeti brze promjene signala, te oštre rubove signala.

Drugi slučaj tranzijentnih izobličenja je kada audio uređaj radi u režimu velikih signala, odnosno u nelinearnom dijelu prijenosne karakteristike. U tom slučaju se javljaju linearna i nelinearna izobličenja, ali u kratkim trenucima, odnosno u ritmu promjene amplitude govornog ili glazbenog signala.

Prilikom konstrukcije audio uređaja, pogotovo pojačala, pazi se na smanjenje izobličenja. U tu svrhu se rabe razne metode, a najčešća je uporaba negativne povratne veze, o kojoj će biti više riječi kasnije. U osnovi radi se o odbijanju ulaznog i izlaznog signala kako bi se dobila što linearnija prijenosna karakteristika. Dakle, kada izlazni signal toliko poraste da postane izobličen, preko povratne veze se taj signal prigušuje i oduzima od ulaznog signala, te se dobiva izlazni signal manje amplitude ali s manje izobličenja. Kod realnih uređaja povratna veza se sastoji od pasivnih komponenata, najčešće otpornika i kondenzatora, tako da signalu treba neko vrijeme da s izlaza "dođe" ponovo na ulaz. Također postoji i malo kašnjenje kroz sam audio uređaj, koje se zbraja s kašnjenjem kroz

povratnu vezu. To znači da u nekim kratkim trenucima povratna veza ne djeluje, ili djeluje sa zakašnjenjem, te su izobličenja izlaznog signala veća nego što bi bila s povratnom vezom. Kako su govor i glazba dinamički signali, te brze promjene su česte i tranzijentna izobličenja kod viših razina su česta.

Mjera kvalitete audio uređaja a u odnosu na mogućnost praćenja brzi promjena audio signala je takozvana brzina porasta signala (*slew rate*), koja naročito dolazi do izražaja kod audio uređaja koji pojačavaju signale relativno visoke razine, kao što su pojačala snage. Brzina porasta se može izmjeriti ako se kroz sustav propusti pravokutni signal, koji predstavlja ekstremno brzi signal, te se izmjeri promjena izlaznog napona u vremenu. Takav slučaj je prikazan na slici 1.27.



Slika 1.27 Mjerenje brzine porasta signala.

Brzina porasta se može izračunati iz odnosa:

$$SR = dU/dt = \tan \alpha_{\max} \quad (\text{V}/\mu\text{s})$$

Mjerenje tranzijentnih izobličenja nije jednostavno, te se u tu svrhu rabe različiti ispitni signali, koji u sebi imaju brze promjene amplitude. Razlikuju se po tome da li su statički ili dinamički. Kod statičkih signala je moguće izmjeriti razinu generiranih harmonika i intermodulacijskih komponenata, ali oni manje odgovaraju realnim signalima. Dinamički ispitni signali mogu poslužiti za mjerenje odziva sustava u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.

U ovom trenutku ćemo navesti samo neke: pravokutni signal, burst signal, MLS, prasak, itd.

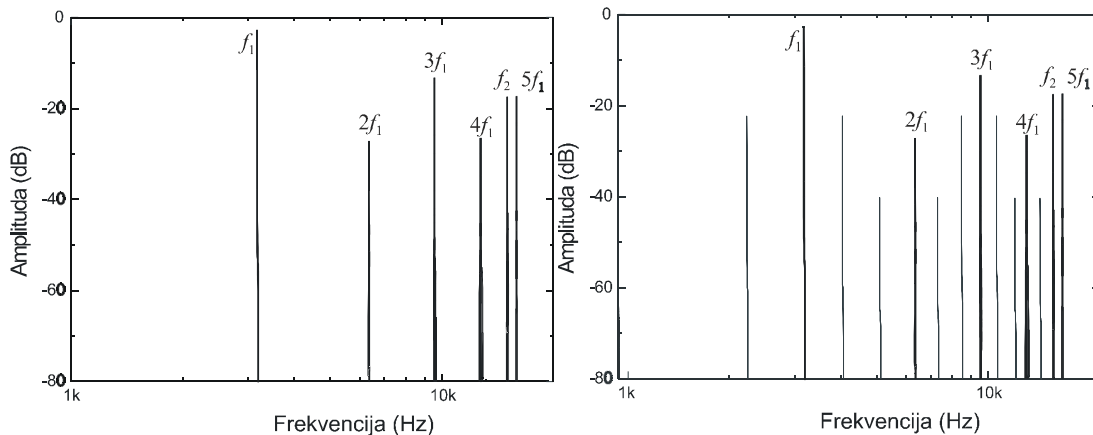
### 1.3.3.1 Mjerenja tranzijentnih izobličenja

Ispitni signal koji se sastoji od sinusnog i pravokutnog signala predložen je za mjerenje dinamičkih izobličenja kod audio pojačala. Frekvencija pravokutnog signala je 3.18 kHz, a sinusnog 15 kHz, s odnosom amplituda 4:1. Pravokutni signal može biti filtriran s gornjom graničnom frekvencijom od 30 kHz ili 100 kHz, a prema tim frekvencijama dolaze oznake za ovu metodu DIM-30 ili DIM-100. Na spektralnom analizatoru očitavaju se vrijednosti novonastalih komponenti koje su produkt intermodulacije između ova dva signala. Zbroj efektivnih amplituda tih komponenata uspoređuje se s amplitudom signala od 15 kHz i tako se dobije postotak izobličenja.

Ova metoda zahtjeva dobar spektralni analizator s velikom dinamikom, da bi se mogli očitati harmonici nastali zbog "mekanih" dinamičkih izobličenja. Budući da brzina

porasta ovog ispitnog signala znatno ovisi o dijelu spektra koji se ne nalazi u čujnom području (preko 20 kHz), kod nekih audio uređaja, koji imaju nisko-propusni filter s gornjom graničnom frekvencijom u tom području, ne mogu se dobiti relevantni rezultati.

Spektri neizobličenog i izobličenog DIM signala prikazani su na slici 1.28.



**Slika 1.28** Spektar neizobličenog i izobličenog DIM-30 ispitnog signala.

### 1.3.4 Šum

Iako se ne radi o vrsti izobličenja, šum možemo smatrati smetnjom koja se javlja kod svih audio uređaja. Šum aktivnih i pasivnih komponenata je posljedica gibanja elektrona u tim elementima i ne može se izbjeći. Pitanje je konstrukcije i upotrijebljenih komponenata kolika će biti konačna razina šuma, koja bi trebala biti što niža.

Osim šuma elektroničkih komponenata, postoji i vanjski šum, koji dolazi iz napajanja kao frekvencija od 50 Hz (brum), koji se pravilnom konstrukcijom može smanjiti na razinu nižu od šuma aktivnih i pasivnih elemenata. Također tu je i vanjski šum od drugih elektronski uređaja i elektromagnetskog šuma.

### ODNOS SIGNAL-ŠUM

Odnos signal šum nekog sustava nam govori koliki je odnos između neke definirane razine signala i razine šuma. Na primjer, ako je definirana razina izlaznog napona pojačala 40 V, a razina šuma oko 1 mV, onda će odnos signal-šum ovog pojačala biti:

$$S/N = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{\max}}{U_{\text{šum}}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{40}{0.001}\right) = 92 \text{ dB}$$

Odnos signal-šum se tako mjeri da se prvo izmjeri definirana razina signala s nazivnim opterećenjem, a nakon toga razina šuma također s nazivnim opterećenjem. Kod mjerenja šuma se može rabiti takozvani psfometrički filter, čija karakteristika odgovara karakteristici ljudskog uha. Na taj način se može odrediti razina širokopojasnog šuma onako kako ga čuje ljudsko uho.

Definiranu razinu signala treba odrediti sam proizvođač uređaja. Na primjer kod pojačala snage to može biti izlazna snaga na nazivnom opterećenju od 1W. Iz te izlazne snage i opterećenja se izračuna razina u voltima. Dakle, prilikom navođenja podatka o odnosu signal-šum, bilo bi dobro navesti uz koju razinu izlaznog signala je izmjeren taj podatak.



## DINAMIKA SUSTAVA

U osnovi šum nam određuje dinamiku sustava. Dinamika sustava je odnos najglasnijeg prema najtišem signalu uz određenu razinu izobličenja. To je osnovna razlika ove veličine prema odnosu signal-šum.

Prilikom mjerenja maksimalne razine signala nekog uređaja, pazi se da harmoničko izobličenje bude ispod određene razine, na primjer 1%. Zbog toga se obično u specifikacijama dinamike navodi i vrijednost harmoničkog izobličenja pri kojem je mjerena maksimalna razina signala.

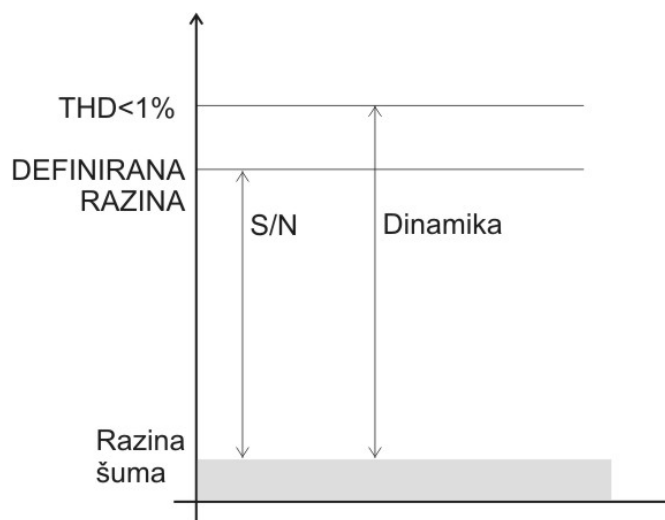
Ako znamo da je prijenosna karakteristika većine sustava više nelinearna upravo pri višim razinama, onda će maksimalna razina signala u slučaju mjerenja dinamike biti obično veća nego kod mjerenja odnosa signal-šum. Mjerenje razine šuma se provodi na jednaki način kao i kod mjerenja odnosa signal-šum. Zbog toga je tako izmjerena dinamika obično veća od odnosa signal-šum.

Poznato je da je dinamika ljudskog sluha oko 120 dB (od praga čujnosti do praga bola), pa bi bilo idealno da svi audio uređaji imaju tu dinamiku kod prijenosa audio signala.

Međutim u realnim sustavima ta je dinamika niža. Već kod snimanja u gluhoj komori, razina šuma u njoj je oko 20 dB, što odmah smanjuje dinamiku na 100 dB. Ovisno o vrsti glazbe, glasnoća će se kretati do 100 dB, tako da je dinamika smanjena za još 20 dB na 80 dB. To je realna dinamika koju bi audio uređaji trebali postići.

Na primjer ako je razina šuma nekog pretpojačala oko 1  $\mu\text{V}$ , to znači da bi prema dinamici od 80 dB, pretpojačalo trebalo dati maksimalni signal od  $1 \mu\text{V} \cdot 10^4 = 10 \text{ mV}$ , po mogućnosti bez izobličenja.

Slika 1.29 prikazuje razliku između odnosa signal-šum i dinamike.

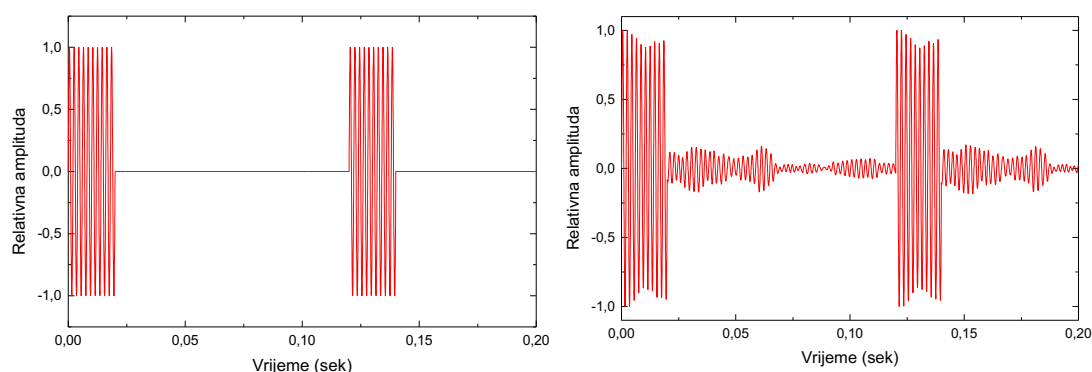


**Slika 1.29** Razlika između odnosa signal-šum i dinamike

### 1.3.5 Impulsni signali

Posebna vrsta ispitnih signala su takozvani impulsni signali, odnosno signali koji imaju karakteristike kratkih impulsa. Ako se provede Fourierova analiza impulsnog signala, dobije se široki spektar s puno frekvencijskih komponenata. Ta karakteristika impulsnih signala se može iskoristiti za mjerenje amplitudne frekvencijske karakteristike

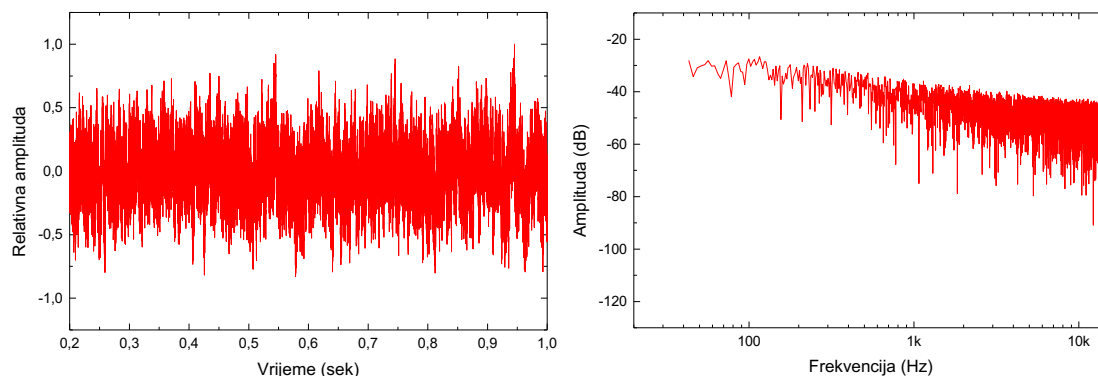
uređaja i zvučnika. Primjer jednog takvog signala i odziva sustava je dan na slici 1.30. Radi se o takozvanom burst signalu, kod kojeg se kroz sustav koji se mjeri u kratkim vremenskim intervalima šalje sinusni signal više frekvencije.



**Slika 1.30** Burst signal i odziv sustava na taj signal.

Na ulaz sustava se dovede impulsni signal, te se na izlazu promatra impulsni odziv u vremenu. Karakteristika dinamičkih signala kratkog trajanja je da imaju široki spektar. Impulsni odziv se može dobiti primjenom križne korelacije između izlaznog i ulaznog signala ili snimanjem, odnosno memoriranjem impulsnog signala koji je prošao kroz uređaj koji se mjeri. Primjenom Fourierove transformacije na impulsni odziv moguće je dobiti amplitudnu frekvencijsku karakteristiku.

Za ovu ispitnu metodu najčešće se koriste MLS (engl. *MLS - Multi Length Sequence*) signali, koji imaju široki spektar i impulsni karakter. Nedostatak ove metode je u tome što se zbog oblika signala, nelinearna izobličenja pojavljuju u impulsnom odzivu i na taj način utječu na amplitudnu frekvencijsku karakteristiku. Na slici 1.31 je prikazan MLS signal u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.



**Slika 1.31** MLS signal u vremenskoj i frekvencijskoj domeni.

Osim MLS signala koriste se kratki sinusni impulsi, koji se zbog kratkoće trajanja mogu koristiti za mjerenje impulsnog odziva viskotonskih zvučnika, bez opasnosti od preopterećenja. Pri mjerenju treba paziti da se ne prijeđe u nelinearni dio prijenosne karakteristike, jer može doći do izobličenja koja se onda pojavljuju u amplitudnoj frekvencijskoj karakteristici. Nedostatak impulsnih signala je relativno mali odnos signal šum. Mjerenja na uređajima s relativno velikim šumom mogu dati nepouzdanе podatke o amplitudnoj frekvencijskoj karakteristici, jer se zajedno s impulsnim signalom usrednjuje i

šum. Zbog toga bi amplituda impulsnog signala trebala biti što veća, ali u tom slučaju može doći do izobličenja.

## 2. OSNOVNI SKLOPOVI AUDIO UREĐAJA

Polje audiotehnike uključuje analizu i konstrukciju niza pasivnih i aktivnih sklopova za obradu signala. Kako bi se bolje razumio rad tih sklopova, potrebno je upoznati se s osnovnim elementima od kojih se ti sklopovi sastoje.

### 2.1 Pasivni elementi

Osnovni elementi za obradu audio signala su pasivni elementi. To su elementi koji za rad ne trebaju nikakvo napajanje, nego se obrada signala vrši jednostavnim djelovanjem značajki tih elemenata. Osnovni pasivni elementi koji se koriste u audiotehnici su otpornici, kondenzatori i induktiviteti. Kondenzatori i induktiviteti spadaju u takozvane reaktivne elemente koji imaju značajku spremanja električne energije u obliku naboja (kondenzator) ili jalove snage (induktivitet). Zajedničko reaktivnim elementima je to što im kompleksna impedancija ovisi o frekvenciji struje, koja prolazi kroz njih.

Kompleksne impedancije kondenzatora i induktiviteta su prikazane slijedećim jednakostima:

$$Z_C = \frac{1}{\omega C} \quad \text{i} \quad Z_L = \omega L, \text{ gdje je } \omega = 2\pi f$$

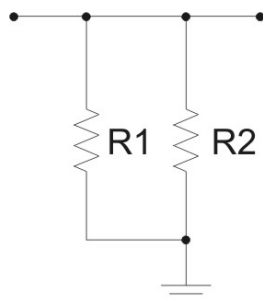
Pasivni elementi u audiotehnici se najčešće koriste za smanjenje napona signala, kao naponski djelitelji i za namještanje prijenosne frekvencijske karakteristike sklopova (filtri).

Najjednostavniji sklopovi s pasivnim elementima su sklopovi s otpornicima, koji se najčešće koriste za namještanje ulaznih ili izlaznih otpora, regulaciju struje kroz sklopove ili za snižavanje razine signala. U svrhu što jednostavnije analize audio sklopova, potrebno je znati osnovne sklopove s otpornicima, odnosno ovladati vještinom zanemarivanja.

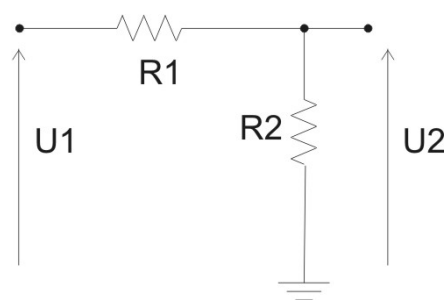
Na slici 2.1 prikazan je paralelni spoj otpornika  $R_1$  i  $R_2$ . Ukupni otpor takvog spoja će biti određene sa slijedećom jednakosti:

$$R_{uk} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Iz ove jednakosti proizlazi nekoliko jednostavnih zaključaka, koji olakšavaju analizu sklopova. Ako su otpornici  $R_1$  i  $R_2$  jednaki otporu  $R$ , ukupni otpor će biti  $R_{uk}=R/2$ . Ako vrijedi da je  $R_1 \gg R_2$ , veća struja će prolaziti kroz otpornik  $R_2$ , odnosno ta struja će biti bliža ukupnoj struji i ukupni otpor će biti približno jednak otporu  $R_2$ , odnosno otpor  $R_1$  se može zanemariti.



Slika 2.1 Paralelni spoj otpornika



Slika 2.2 Naponski djelitelj

Na slici 2.2 je prikazan serijski spoj otpora  $R1$  i  $R2$ , s time da se izlazni signal  $U2$  uzima s otpora  $R2$ . Postavlja se pitanje koliki će biti izlazni signal  $U2$  u ovisnosti o otporima i ulaznom signalu  $U1$ . Ovaj sklop je takozvani naponski djelitelj i vrijednost izlaznog signala će biti određena slijedećom jednakosti:

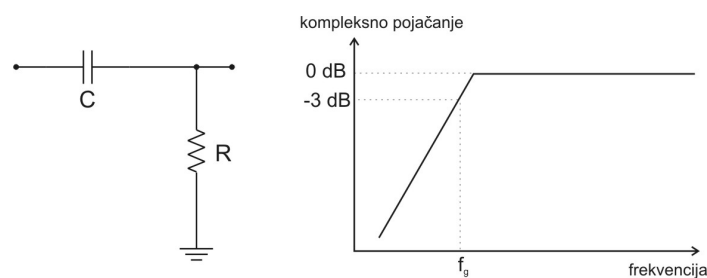
$$U2 = U1 \cdot \frac{R2}{R1 + R2}$$

Ako su oba otpora jednaka, iz ove jednakosti je vidljivo da će izlazni napon  $U2$  biti duplo manji od ulaznog napona  $U1$ .

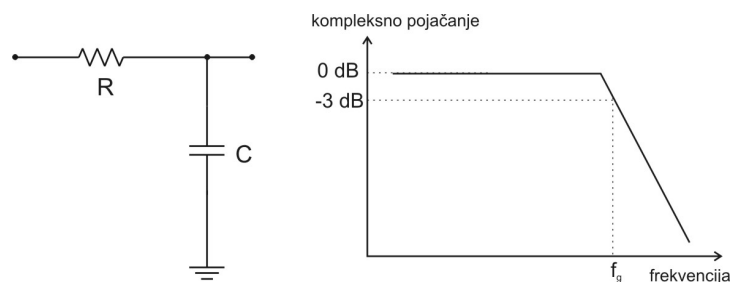
Ova jednakost vrijedi i za kompleksne impedancije, čija impedancija ovisi o frekvenciji. Ovu činjenicu možemo iskoristiti za konstrukciju jednostavnih filtarskih sklopova, odnosno sklopova čija prijenosna frekvencijska karakteristika ovisi o frekvenciji.

Najjednostavniji pasivni filtarski sklopovi su takozvani CR i RC spojevi, koji su prikazani na slikama 2.3 i 2.4, s frekvencijskom ovisnosti pojačanja signala, odnosno prijenosnom frekvencijskom karakteristikom. Prilikom crtanja ove prijenosne frekvencijske karakteristike, možemo se koristiti tehnikom zanemarivanja.

Na primjer, za CR sklop na slici 2.3, na jako niskim frekvencijama impedancija kondenzatora  $C$  će biti jako velika. Prema Ohmovom zakonu, na tim frekvencijama najveći pad napona će biti na kondenzatoru, a mali na otporu  $R$ . To znači da će razina izlaznog signala biti mala i pojačanje signala će biti jako malo. Kako frekvencija raste, tako se smanjuje impedancija kondenzatora i postoji sve veći pad napona na otporu  $R$ , odnosno raste izlazni napon. Dakle raste i pojačanje signala. Na nekoj frekvenciji  $f_g$ , impedancija kondenzatora  $C$  i vrijednost otpora  $R$  će biti jednake. Na toj frekvenciji će izlazni napon biti duplo manji od ulaznog napona. Ova frekvencija se naziva granična frekvencija. Iznad te frekvencije, impedancija kondenzatora postaje sve manja i u sklopu dominira otpornik  $R$ . Na jako visokim frekvencijama, impedancija kondenzatora je jako mala i može se zanemariti, što znači da ona predstavlja kratki spoj i izlazni napon je jednak ulaznom naponu, odnosno pojačanje signala je jednako 1, odnosno 0 dB. Ovaj sklop se naziva visoko-propusni filter, jer je pojačanje signala frekvencija iznad granične frekvencije jednako 1, a ispod granične frekvencije je manje od 1.



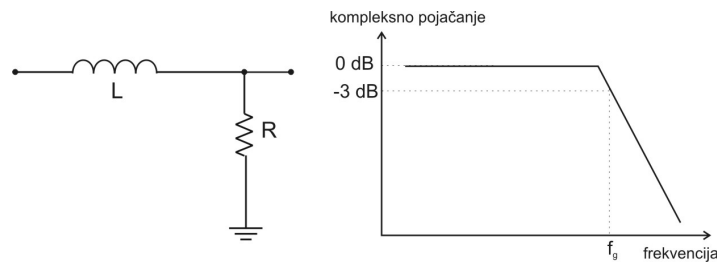
Slika 2.3 CR sklop



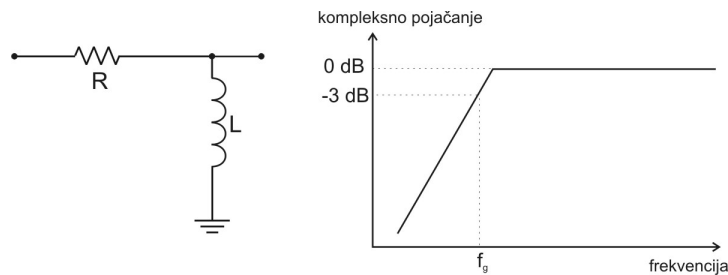
Slika 2.4 RC sklop

Na slici 2.4 je prikazan RC sklop, kod kojega možemo provesti jednaku analizu. Na jako niskim frekvencijama, impedancija kondenzatora je jako visoka, odnosno puno veća od otpora  $R$ . To znači da je sav pada napona na kondenzatoru, odnosno pojačanje sklopa je 1. S porastom frekvencije impedancija kondenzatora se smanjuje, a time se smanjuje i razina izlaznog napona i pojačanje signala pada. Granična frekvencija je također određena vrijednostima otpora i kondenzatora. Ovaj sklop se naziva nisko-propusni filter.

Na jednaki način možemo analizirati sklopove otpornika i induktiviteta, prikazane na slikama 2.5 i 2.6. U ovom slučaju je impedancija induktiviteta proporcionalna frekvenciji signala.



Slika 2.5 LR spoj



Slika 2.6 RL spoj

## 2.2 Aktivni elementi

Aktivni elementi su elementi na bazi silicija koji na neki način utječu na regulaciju struje ili napona signala. Pomoću njih se konstruiraju razni sklopovi od predpojačala, aktivnih filtera do pojačala snage. Najvažniji aktivni elementi u audiotehnici su dioda, Zener dioda i tranzistor. Pomoću njih se konstruiraju drugi sklopovi, diskretni ili integrirani. Najvažniji integrirani sklop u audiotehnici je operacijsko pojačalo, koje je osnova za niz drugih sklopova.

### *Dioda*

Dioda je najjednostavniji poluvodički element, koji nastaje spajanjem p i n kristala. Karakteristično za diodu je da vodi struju samo u jednom smjeru, od anode prema katodi, prilikom vođenja na njoj postoji pad napona 0,6-0,7 V. Koristi se u ispravljačima izmjeničnog signala, u izvorima struje, te sklopovima za regulaciju napona.

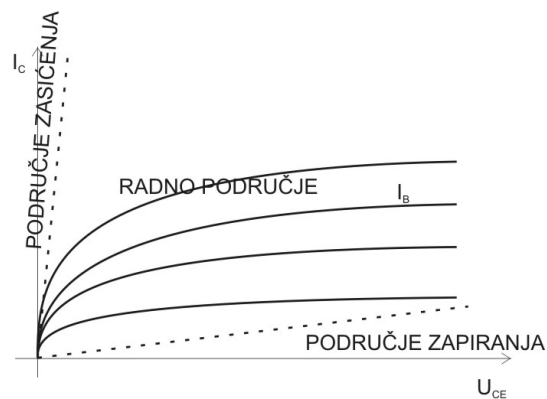
### *Zener dioda*

Ovaj element u jednom smjeru vodi kao dioda, s padom napona od 0,6-0,7 V, a u drugom smjeru vodi do određenog napona. Na primjer, ako na katodu 12V Zener diode dovedemo napon koji je manji od 12V neće se ništa promijeniti, međutim ako napon poraste iznad 12V Zener dioda će održavati svoj specificirani napon od 12V.

### Tranzistor

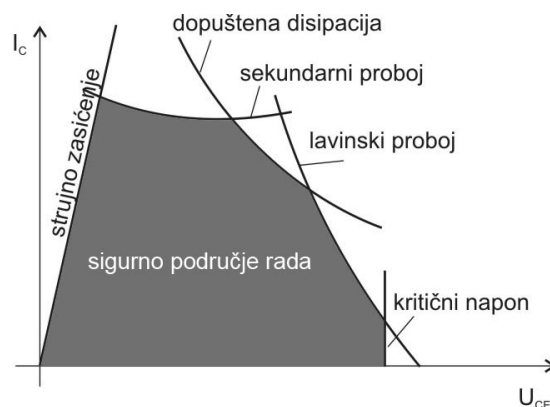
Tranzistor je osnovni element složenijih poluvodičkih sklopova. Bipolarni tranzistor se sastoji od tri poluvodička sloja: n-p-n i p-n-p. Tranzistori s efektom polja se dijele na n i p tip.

U osnovi tranzistor se može shvatiti kao element u kojem s malom strujom (npr. struja baze) upravljamo s relativno velikom strujom (npr. struja kolektora). Zbog toga se tranzistor najčešće koristi u pojačalima signala, gdje se koristi za pojačavanje struje odnosno napona. Značajke tranzistora se prikazuju njegovim ulaznim i izlaznim karakteristikama. Na slici 2.7 prikazana je ulazna karakteristika bipolarnog tranzistora, koja odgovara karakteristici diode i prikazuje ovisnost struje kolektora o naponu baza-emiter. Bipolarni tranzistor počinje provoditi struju kada napon između baze i emitera prijeđe 0,6-0,7 V. Kako raste struja baze tako će rasti i struja kolektora, odnosno emitera. Razlika između struje kolektora i struje baze se naziva strujno pojačanje tranzistora, koje se kreće od 20 do 200 ovisno o tranzistoru. Na slici 2.8 je prikazana izlazna karakteristika tranzistora, koja prikazuje ovisnost struje kolektora o naponu kolektor-emiter i struji baze (ili naponu baza-emiter). Na toj karakteristici se definiraju tri područja rada tranzistora: područje zasićenja, s maksimalnom strujom i minimalnim naponom; područje zapiranja s maksimalnim naponom i minimalnom strujom; i radno područje između njih gdje se obično postavlja radna točka tranzistora.



Slika 2.8 Izlazna karakteristika tranzistora

Prilikom određivanja radne točke tranzistora, te općenito radnog područja tranzistora potrebno je paziti na sigurno područje rada tranzistora. Ono prikazuje granične vrijednosti napona i struje, koje se ne smiju prijeći kako ne bi došlo do uništenja tranzistora. Slika 2.9 prikazuje sigurno područje rada koje je omeđeno krivuljama različitih efekata koji se pojavljuju kod poluvodičkih elemenata.



Slika 2.9 Sigurno područje rada tranzistora

Treba imati na umu da karakteristike tranzistora dosta ovise o temperaturi. Pri višim temperaturama sigurno područje rada se suzuje, odnosno granične vrijednosti napona i struje se smanjuju.

### 2.3 Povratna veza

Jedna od metoda osiguravanja stabilnosti i niskih izobličenja u sklopu je uporaba negativne povratne veze. Dovođenje izlaznog signala na ulaz nekog sklopa se naziva povratna veza. Ako tako dovedeni izlazni signal i ulazni signal nisu u fazi to se naziva negativna povratna veza. Ako su u fazi naziva se pozitivna povratna veza.

U audiotehnici se koristi negativna povratna veza jer omogućuje namještanje nekih značajki audio sklopova. Negativna povratna veza ima prednosti i nedostataka. Najveći nedostatak negativne povratne veze je u tome što smanjuje pojačanje sklopa. Taj problem se može lako riješiti spajanjem nekoliko stupnjeva pojačanja u seriju.

Prednosti negativne povratne veze su slijedeće:

- manja nelinearna izobličenja,
- manji naponi smetnji,
- mogućnost namještanja ulaznog i izlaznog otpora sklopa,
- šire frekvencijsko područje rada sklopa.

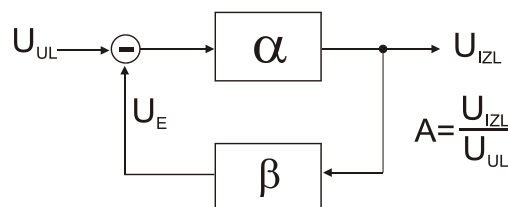
Na slici 2.10 shematski je prikazan sklop nekog pojačala s povratnom vezom. S  $\alpha$  je predstavljeno pojačanje sklopa bez povratne veze, a s  $\beta$  pojačanje same povratne veze. Iz sheme na slici se može izvesti izraz za ukupno pojačanje signala:

$$A = \frac{U_{izl}}{U_{ul}} = \frac{\alpha}{1 + \alpha\beta}$$

Ako se sklop tako konstruira da je njegovo pojačanje bez povratne veze  $\alpha$  jako veliko izraz za pojačanje se svodi na slijedeći izraz:

$$A = \frac{1}{\beta} \quad \alpha \gg$$

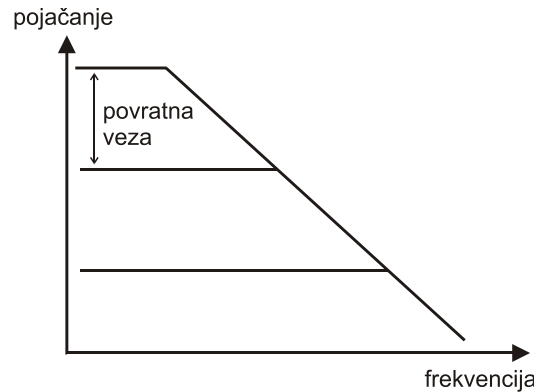
To znači da će ukupno pojačanje sklopa ovisiti samo o elementima u povratnoj vezi. Povratna veza se najčešće radi s pasivnim elementima, tako da će ukupno pojačanje malo ovisiti o promjenama temperature, napajanja i slično.



Slika 2.10 Shematski prikaz sklopa s povratnom vezom

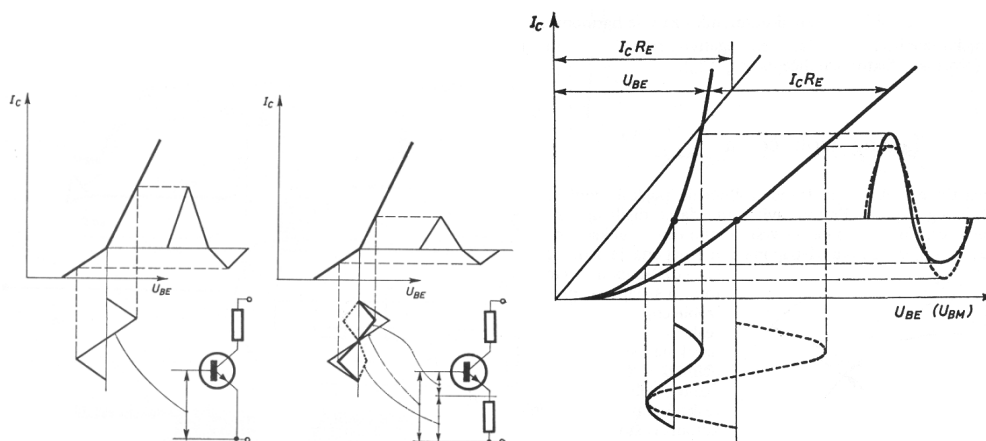
Na slici 2.11 prikazano je kako povratna veza utječe na proširenje frekvencijskog područja. Kada nemaju negativnu povratnu vezu, audio sklopovi najčešće imaju relativno usko frekvencijsko područje rada, ali veliko pojačanje. S uključivanjem negativne povratne veze, ukupno pojačanje se smanjuje, ali se proširuje frekvencijsko područje rada. Što je gornja granična frekvencija sklopa viša, to će pojačanje sklopa biti manje.





Slika 2.11 Ovisnost pojačanja sklopa i širine frekvencijskog područja rada

Na slici 2.12 je prikazano kako negativna povratna veza utječe na smanjenje nelinearnih izobličenja, odnosno izravnavanje prijenosne karakteristike sklopa. Na slici je prikazan primjer jednostavnog pojačala signala s jednim tranzistorom gdje je negativna povratna veza je predstavljena otpornikom u emiteru. Prijenosna karakteristika samog tranzistora je nelinearna. Dodavanjem negativne povratne veze, koja ima linearnu prijenosnu karakteristiku (predstavljenu pravce) ukupna prijenosna karakteristika će biti više linearna.



Slika 2.12 Lineariziranje prijenosne karakteristike sklopa s negativnom povratnom vezom.

Što se tiče ulaznih i izlaznih otpora, s negativnom povratnom vezom je moguće namještati vrijednosti tih otpora. Serijska negativna povratna veza povećava, a paralelna smanjuje ulazni otpor sklopa. Jednako vrijedi za izlazni otpor sklopa.

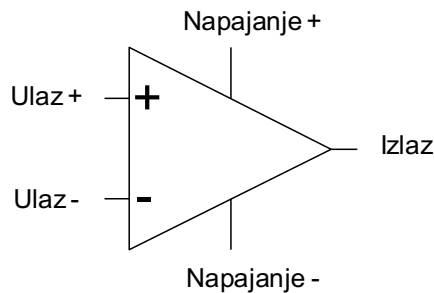
## 2.4 Sklopovi s operacijskim pojačalima

### Operacijska pojačala

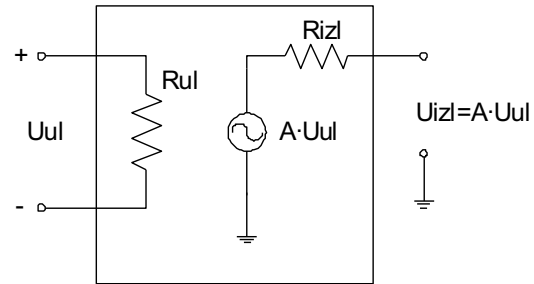
Operacijska pojačala imaju široku primjenu u audiotehnici. Ona su bazirana na diferencijalnim pojačalima, koja su tako konstruirana da pojačavaju razliku signala. Konstrukcija diferencijalnih pojačala omogućuje da budu imuna na promjene parametara tranzistora (na primjer s temperaturom). Zbog toga su vrlo pogodna za razne primjene. U početku su se diferencijalna pojačala koristila za provođenje matematičkih operacija, pa su po tome dobila naziv operacijska pojačala. Danas se primjenjuju u raznim poljima obrade signala, od samog pojačavanja signala, u analognim instrumentima do ulaza u digitalne

sustave. Prednost operacijskih pojačala je u tome što se lako primjenjuje negativna povratna veza, koja se obično sastoji od pasivnih elemenata, otpornika i kondenzatora.

Na slici 2.13 prikazan je simbol operacijskog pojačala s najvažnijim izvodima. Postoje dva ulazna izvoda, pozitivni i negativni, te jedan izlaz. Ako se signal dovede na pozitivni ulaz, to će uzrokovati pozitivnu promjenu signala. Na primjer ako se na ulaz dovede signal razine 1V, izlazni signal će biti 1V puta pojačanje sklopa. Ako se na negativni ulaz dovede signal razine 1V, izlazni signal će biti -1V puta pojačanje. Minus ispred razine izlaznog signala treba shvatiti na dva načina. Ako se na ulaz dovede istosmjerni signal, izlazni signal će imati obrnuti predznak. Ako se na ulaz dovede izmjenični signal, izlazni signal će biti imati obrnutu fazu.



Slika 2.13 Simbol operacijskog pojačala



Slika 2.14 Pojednostavljeni model operacijskog pojačala

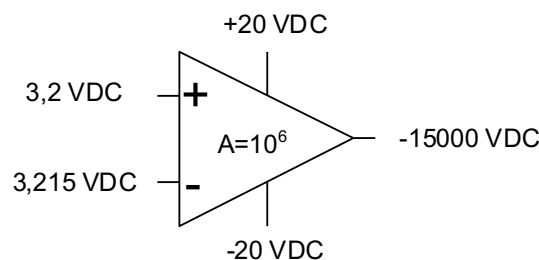
Slika 2.14 prikazuje pojednostavljeni model operacijskog pojačala. U osnovi izlazni napon će biti razlika signala na ulaznim izvodima pojačala puta pojačanje sklopa  $A$ . Idealno operacijsko pojačalo bi imalo slijedeće karakteristike:

- beskonačni ulazni otpor  $\rightarrow$  pretpostavka je da je struja koja prolazi kroz  $R_{ul}$  jednaka 0;
- izlazni otpor je nula ( $R_{izl}=0$ )  $\rightarrow$  idealno naponsko pojačalo
- veliko pojačanje  $A$
- $U_{izl}=0$  kada su  $U_{ul}(+)$  i  $U_{ul}(-)$  jednaki.

Realno operacijsko pojačalo se razlikuje od idealnog u tome što mu se ulazni otpor kreće do 100 M $\Omega$ , izlazni otpor ispod 10  $\Omega$ , a pojačanje  $A$  je oko  $10^6$ .

#### DC i AC pojačalo signala

Na slici 2.15 prikazano je jedno pojačalo istosmjernog signala. Razina izlaznog signala je ograničena naponom napajanja sklopa, odnosno maksimalni izlazni signal ima vrijednost napona napajanja. Ako se na plus ulaz dovede 3,2 VDC, a na negativni ulaz 3,215 VDC, a pojačanje bez povratne veze je  $10^6$  izlazni signal bi trebao biti -15.000 VDC. Međutim, zbog puno manjeg napona napajanja, izlazni napon će biti -20 VDC.



Slika 2.15 Pojačalo istosmjernog (DC) signala

Bez negativne povratne veze, pojačanje sklopa je jako visoko, tako da se i kod malih razina dobije rezanje signala. Kako bi imali bolju kontrolu nad pojačanjem i proširili frekvencijskog područje operacijskog pojačala, moramo uvesti negativnu povratnu vezu.

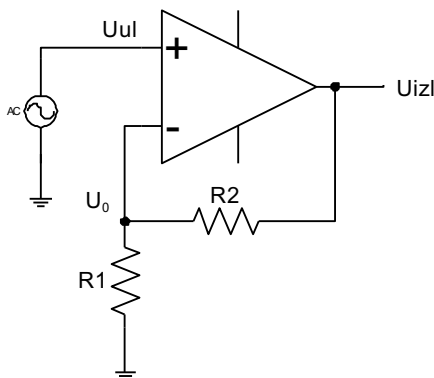
### Neinvertirajuće pojačalo

Slika 2.16a prikazuje sklop za pojačanje signala koji ne okreće fazu signala. Negativna povratna veza je ostvarena otpornicima  $R1$  i  $R2$ . Pretpostavka je da je ulazni otpor operacijskog pojačala jako velik, što znači da je struja koja teče kroz njega jako mala. U tom slučaju su pozitivni i negativni ulaz u operacijsko pojačalo na istom potencijalu, odnosno ulazni signal  $U_{ul}$  se nalazi na negativnom izvodu operacijskog pojačala koji je spoje na oba otpornika ( $U_0$ ). Koristeći jednakost za naponski djelitelj možemo napisati slijedeću jednakost:

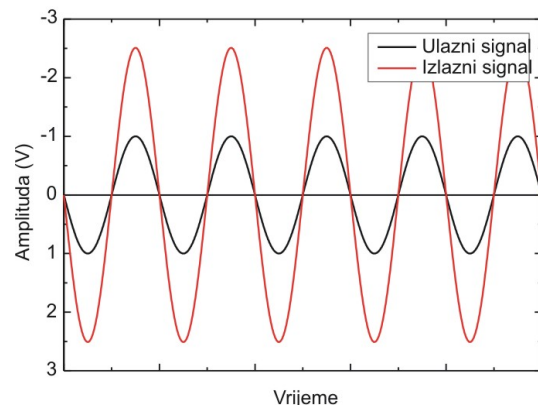
$$U_0 = U_{ul} = U_{izl} \frac{R1}{R1 + R2}$$

Iz toga proizlazi izraz za ukupno apsolutno pojačanje sklopa:

$$A = \frac{U_{izl}}{U_{ul}} = 1 + \frac{R2}{R1}$$



Slika 2.16a Sklop neinvertirajućeg pojačala



Slika 2.16b Oblik ulaznog i izlaznog signala sklopa iz primjera.

**Primjer 2.1:** Treba konstruirati pojačalo signala s pojačanjem od 8 dB bez okretanja faze signala.

Pojačanje u dB se računa prema slijedećoj jednakosti:  $A[dB] = 20 \cdot \log \left( \frac{U_{izl}}{U_{ul}} \right)$ .

Iz ove jednakosti se može izračunati apsolutno pojačanje:  $A = 10^{8/20} = 2,51$ . Ako uzmemo da je vrijednost otpornika  $R1=1 \text{ k}\Omega$ , onda iz jednadžbe za apsolutno pojačanje sklopa izlazi da vrijednost otpornika  $R2$  mora biti  $1,51 \text{ k}\Omega$ .

Na slici 2.16b je prikazan oblik ulaznog i izlaznog signala, kada je razina ulaznog signala 1 V.

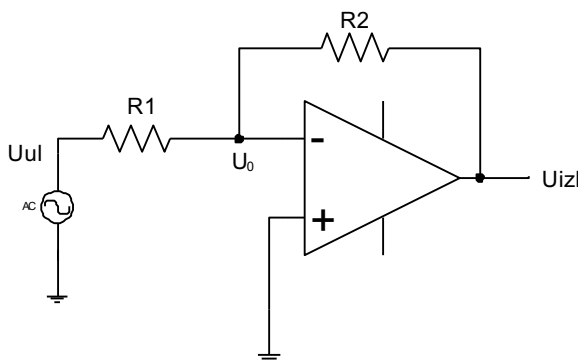
### Invertirajuće pojačalo

Na slici 2.17a je prikazan sklop invertirajućeg pojačala kod kojega se ulazni i izlazni signali razlikuju u fazi. Opet je pretpostavka da je ulazni otpor operacijskog pojačala jako visok, odnosno da je struja u pozitivni i negativni izvod jednaka nuli. Kako je pozitivni izvod na nultom potencijalu, tako je i negativni izvod na nultom potencijalu. Zbog toga su struje koje prolaze kroz otpornike  $R1$  i  $R2$  jednake ali obrnutog smjera. Možemo napisati slijedeći izraz:

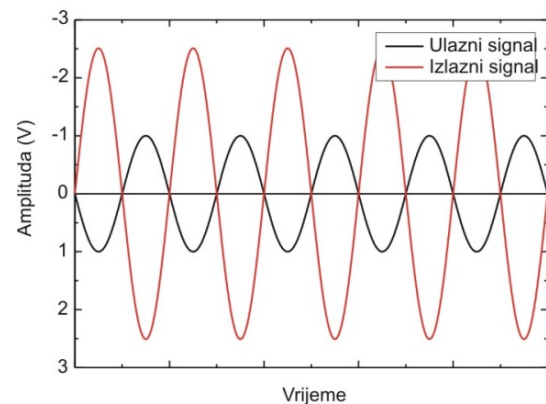
$$I(R1) = \frac{U_{ul}}{R1} = -I(R2) = -\frac{U_{izl}}{R2}$$

Iz ove jednakosti proizlazi izraz za ukupno apsolutno pojačanje sklopa:

$$A = \frac{U_{izl}}{U_{ul}} = -\frac{R2}{R1}$$



Slika 2.17a Sklop invertirajućeg pojačala



Slika 2.17b Oblik ulaznog i izlaznog signala sklopa iz primjera.

**Primjer 2.2:** Treba konstruirati pojačalo signala s pojačanjem od 8 dB koristeći invertirajuće pojačalo.

Pojačanje u dB se računa prema slijedećoj jednakosti:  $A[dB] = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{izl}}{U_{ul}}\right)$ .

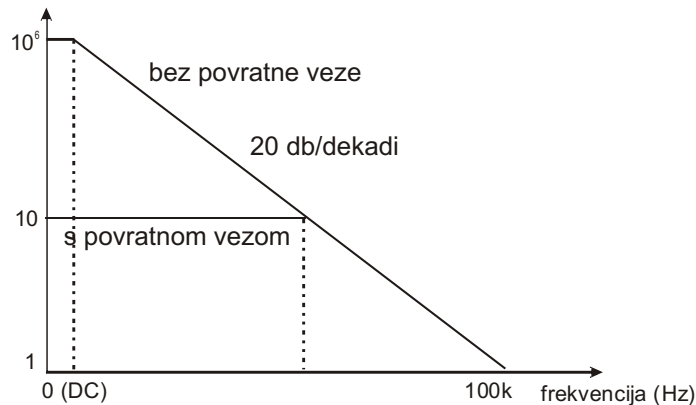
Iz ove jednakosti se može izračunati apsolutno pojačanje:  $A = 10^{8/20} = 2,51$ . Ako uzmemo da je vrijednost otpornika  $R1=1 \text{ k}\Omega$ , onda iz jednadžbe za apsolutno pojačanje sklopa izlazi da vrijednost otpornika  $R2$  mora biti 2,51 kΩ.

Na slici 2.17b je prikazan oblik ulaznog i izlaznog signala, kada je razina ulaznog signala 1 V.

### Frekvencijska karakteristika

Već prije je spomenuto da je frekvencijsko područje rada operacijskog pojačala bez povratne veze relativno usko. Kako bi se proširilo frekvencijsko područje rada, potrebno je primijeniti povratnu vezu, koja će smanjiti ukupno pojačanje sklopa. Na slici 2.18 je prikazano kako pojačanje operacijskog pojačala ovisi o frekvenciji. Bez povratne veze, pojačanje operacijskog pojačala je jako visoko, ali to je pojačanje konstantno do relativno niske frekvencije, koja se kod realnih pojačala kreće oko par stotina Herza. Nakon te frekvencije pojačanje pada sa 6 dB/oktavi ili 20 dB/dekadi. S uvođenjem negativne

povratne veze, pojačanje je niže ali je gornja granična frekvencija pomaknuta na više frekvencije.



Slika 2.18 Ovisnost pojačanja operacijskog pojačala bez i s povratnom vezom o frekvenciji.

**Primjer 2.3:** Od proizvođača operacijskog pojačala su dobiveni slijedeći podaci: pojačanje pojačala bez povratne veze je 100 dB, a gornja granična frekvencija pojačanja bez povratne veze je 100 Hz. Pojačanje nakon gornje granične frekvencije pada s 20 dB/dekadi. Koliko mora biti ukupno pojačanje operacijskog pojačala s povratnom vezom, kako bi gornja granična frekvencija bila 100 kHz?

Iz podatka o padu pojačanja od 20 dB/dekadi i razlike gornjih graničnih frekvencija, moguće je izračunati za koliko je potrebno spustiti pojačanje sklopa:

$$\Delta A = 20 \cdot \log\left(\frac{f_2}{f_1}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{100 \text{ kHz}}{100 \text{ Hz}}\right) = 60 \text{ dB}$$

Dakle, ukupno pojačanje sklopa će biti 100 dB – 60 dB = 40 dB, ali će gornja granična frekvencija biti 100 kHz.

#### Reaktivni elementi u povratnoj vezi

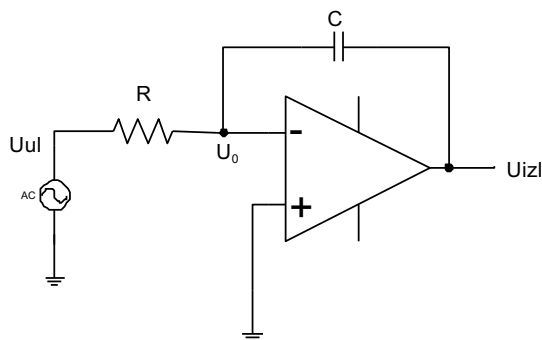
Ubacivanjem reaktivnih elemenata (kondenzatori, induktiviteti) u povratnu vezu, možemo dodatno utjecati na frekvencijsku karakteristiku pojačanja sklopa, te omogućiti frekvencijsku i vremensku obradu signala.

Na slici 2.19a prikazan je sklop invertirajućeg pojačala s kondenzatorom u povratnoj vezi. Poznato je od prije da impedancija kondenzatora ovisi o frekvenciji, tako će i ukupno pojačanje sklopa ovisiti o frekvenciji. Konkretno za ovaj sklop pojačanje će konstantno padati s frekvencijom, kako je prikazano na slici 2.19b. Izraz za pojačanje ovog sklopa će u tom slučaju biti:

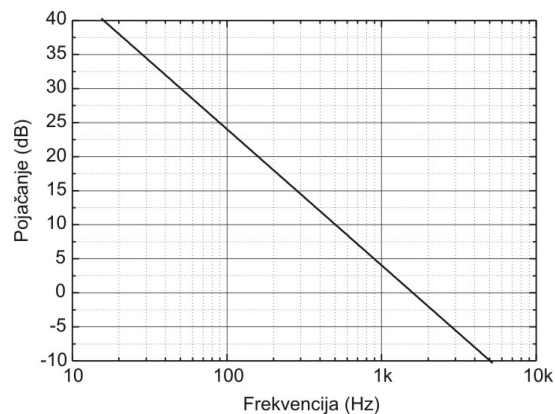
$$A = -\frac{1}{\omega CR}$$

Ovaj sklop se još i naziva integrator, zato što je izlazni signal rezultat integracije ulaznog signala:

$$U_{izl} = \frac{1}{C} \int i \, dt = \frac{1}{RC} \int U_{ul} \, dt$$



Slika 2.19a Sklop invertirajućeg pojačala s kondenzatorom u povratnoj vezi



Slika 2.19b ovisnost pojačanja sklopa o frekvenciji.

Ako se zamjene mjesta otpornika i kondenzatora dobije se sklop koji se naziva derivator i čije pojačanje raste s frekvencijom prema slijedećoj jednakosti:

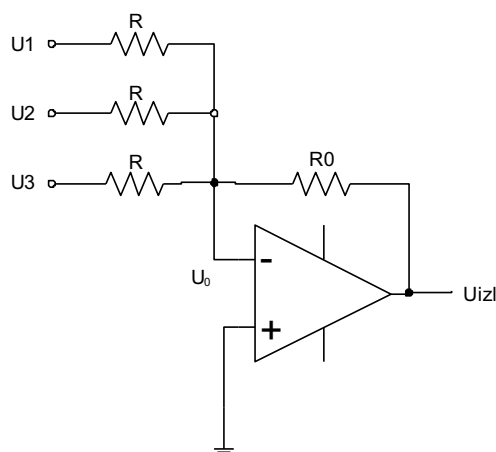
$$A = -\omega RC$$

Oblik izlaznog signala će biti definiran slijedećoj jednakosti:

$$U_{izl} = -i \cdot R = -RC \frac{dU_{ul}}{dt}$$

#### Osnovne matematičke operacije

Kao što je već spomenuto, operacijska pojačala se mogu koristiti za provođenje osnovnih matematičkih operacija zbrajanja i oduzimanja.



Slika 2.20 Shema sklopa za zbrajanje signala.

Na slici 2.20 je prikazan sklop za zbrajanje signala. Izlazni signal se može izračunati prema slijedećoj jednakosti, koja je izvedena iz tog sklopa:

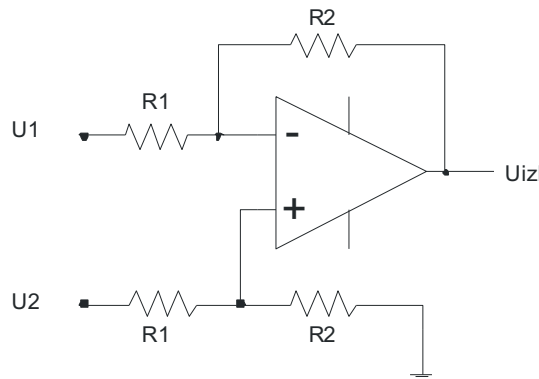
$$U_{izl} = -\frac{R0}{R} (U1 + U2 + U3 + \dots)$$

Ako se otpornici  $R$  zamjene s potenciometrima, koji imaju vrijednosti otpora  $R_1, R_2, R_3, \dots$  tada se može ostvariti općenito zbrajalo, koje je osnova za stolove za miješanje signala. U tom slučaju izlazni signal se može izračunati kao:

$$U_{izl} = -R_0 \left( \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} + \dots \right)$$

Slika 2.21 prikazuje sklop za oduzimanje signala. Izlazni signal se može izračunati prema slijedećoj jednakosti:

$$U_{izl} = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1)$$



Slika 2.21 Sklop za oduzimanje signala

## 2.5 Audio transformatori

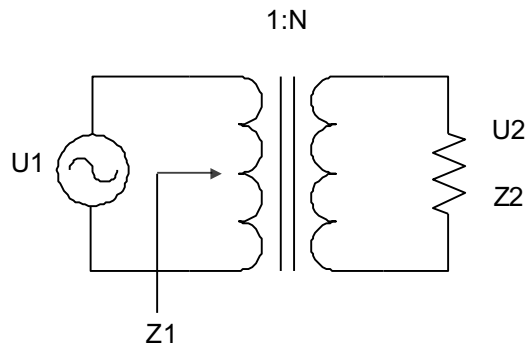
U audiotehnici se za pojačanje signala ponekad koriste transformatori, koji u nekim slučajevima imaju prednost na aktivnim sklopovima. Oni se koriste za pojačanje signala u situacijama kada je potrebno prilagoditi ulaznu impedanciju slijedećeg stupnja na izlaznu impedanciju prethodnog stupnja. Osim toga oni optimiziraju odnos signal šum, te omogućuju galvansko razdvajanje signala.

Na slici 2.22 su prikazane osnovne vrijednosti koje se povezuju s audio transformatorima. Iz ove sheme se mogu izvući osnovne jednakosti transformatora, uzimajući u obzir odnos broja zavoja primara i sekundara  $N$ :

$$U_2 = U_1 \cdot N \quad I_2 = I_1 / N$$

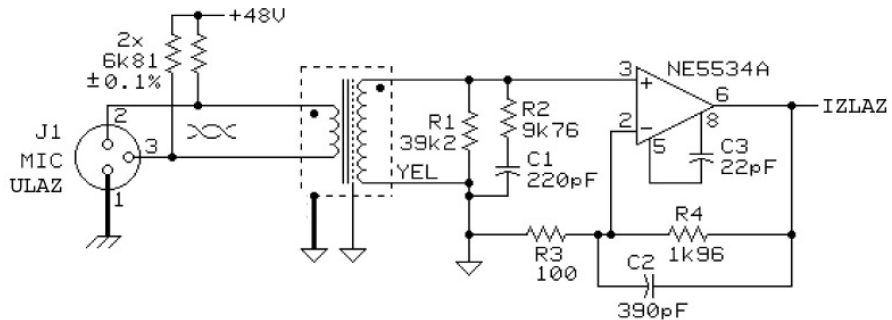
$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{N} \cdot \frac{1}{I_2 \cdot N} = \frac{Z_2}{N^2}$$

Impedancija  $Z_1$  je impedancija koju "vidi", odnosno koja predstavlja opterećenje generatora signala, a impedancija  $Z_2$  je ulazna impedancija slijedećeg stupnja. Na primjer ako je ulazna impedancija slijedećeg stupnja  $10 \text{ k}\Omega$ , a odnos zavoja je 10, generator signala će biti opterećen sa  $10 \text{ k}\Omega / 10^2 = 100 \text{ }\Omega$ , dakle s puno manjom impedancijom, što će uzrokovati protok veće struje kroz primarni dio transformatora, ako se želi zadržati jednaka razina napona generatora.



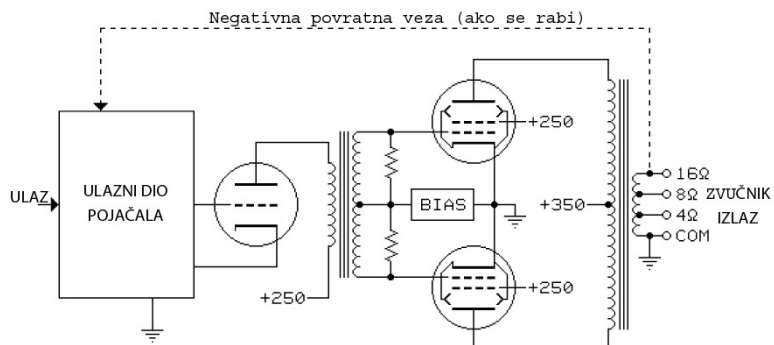
Slika 2.22 Shema transformatora

Na slici 2.23 je prikazan sklop mikrofonskog predpojačala koje uključuje audio transformator i operacijsko pojačalo. Ovaj sklop uključuje i fantomsko napajanje, koje je potrebno u slučaju kondenzatorskih mikrofona. Ako je izlazna impedancija mikrofona  $150\Omega$ , a odnos zavoja 5, to će se preslikati na stranu sekundara kao generator signala s 5 puta većim naponom i 25 puta većim izlaznim otporom. Zbog toga je ulazni otpor operacijskog pojačala podignut, tako da bude barem 10 puta veći, radi boljeg prilagođenja.



Slika 2.23 Mikrofonsko predpojačalo s transformatorom

Još jedno područje gdje se koriste audio transformatori su izlazni stupnjevi cijevnih pojačala. Cijevna pojačala imaju relativno veliki izlazni otpor, veći od otpora zvučnika, tako da je potrebno napraviti prilagođenje signala na malu impedanciju zvučnika. Slika 2.24 shematski prikazuje izlazni stupanj cijevnog pojačala.

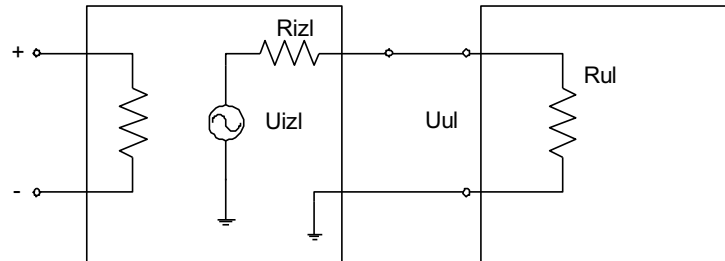


Slika 2.24 Shematski prikaz izlaznog stupnja cijevnog pojačala s transformatorom za prilagođenje impedancije.



## 2.6 Ulazne i izlazne impedancije

U audiotehnici se susrećemo s uređajima, koji imaju različite ulazne i izlazne otpore, odnosno impedancije. Postavlja se pitanje što se događa ako se spoji izlaz uređaja s jako niskom izlaznom impedancijom na uređaj s jednako niskom ulaznom impedancijom. Svaki audio inženjer, prilikom spajanja uređaja, mora biti svjestan tih vrijednosti, kako ne bi došlo do preopterećenja sklopova ili do njihovog uništenja.



Slika 2.25 Shematski prikaz spajanja uređaja

Na primjer, ako je izlazni otpor nekog uređaja  $600 \Omega$ , i taj se uređaj spoji s nekim uređajem koji ima ulazni otpor  $10 \text{ k}\Omega$ , što će se dogoditi ako se zbog zamjene uređaja ili nekog drugog razloga ulazna impedancija drugog uređaja smanji. Uz pretpostavku da će izlazni napon prvog uređaja ostati jednak, to će značiti povećanje struje u krugu u kojem se nalaze izlazni i ulazni otpor, kako je prikazano na slici 2.25. Ako prvi uređaj ne može dati potrebnu struju doći će do pada napona izlaznog signala, ili će doći do preopterećenja, što može dovesti do povećanja izobličenja ili čak uništenja prvog uređaja.

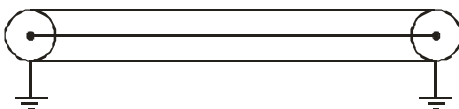
U audiotehnici se najčešće susrećemo s naponskim izvorima. To su izvori čiji je izlazni otpor relativno mali, te koji neće mijenjati razinu svog signala s promjenom opterećenja. Međutim, kod realnih uređaja to nije slučaj i izlazni otpor nekog uređaja može biti i do park  $\text{k}\Omega$ .

Strujni izvori su sklopovi čiji je izlazni otpor relativno velik i koji će uvijek davati struju jednake razine bez obzira na promjenu opterećenja.

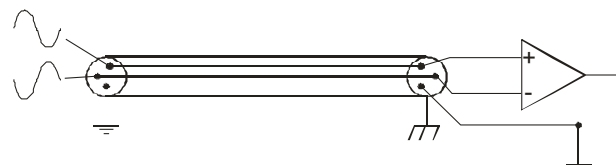
U svakom slučaju, prije spajanja uređaja treba dobro provjeriti njihove specifikacije, te granične vrijednosti opterećenja uređaja.

### Balansirani i nebalansirani ulazi i izlazi

Prilikom spajanja audio uređaja, možemo se susresti s takozvanim nebalansiranim i balansiranim priključcima. Nebalansirani priključci, odnosno kabeli, slika 2.26a, su oni priključci i kabeli koji u osnovi imaju dva izvoda. Jedan izvod služi za prijenos signala, a drugi predstavlja nulti potencijal. Takvi kabeli i priključci su podložni smetnjama, tako da se u slučaju dužih kabela koriste balansirane izvedbe.



Slika 2.26a nebalansirani kabel



Slika 2.26b Balansirani kabel

Kod balansiranog kabela, koji je prikazan na slici 2.26b, postoje tri izvoda, odnosno žile. Jedna žila predstavlja nulti potencijal, a druge dvije služe za prijenos signala. Kroz te obje žile prenosi se jednaki signal, ali s fazom zakrenutom za  $180^\circ$ . Balansirani priključak

mora uključivati diferencijalno pojačalo, koje pojačava razliku signala između spomenute dvije žile. Uz pretpostavku da će se u obje žile, zbog vanjskih smetnji, generirati šum koji je u fazi, oduzimanjem ta dva signala, šum će se poništiti, a prenošeni signal zbrojiti:

$$U_{izl} = U_1 - U_2 = (U + U_{\text{šum}}) - (-U + U_{\text{šum}}) = 2U$$

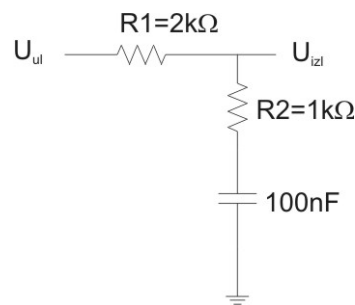
### Kapacitet kabela

Kod jako dugačkih kabela, njihov kapacitet može igrati veliku ulogu. Nadomjesna shema kabela je predstavljena jednostavnim RC sklopom.  $R$  predstavlja otpor kabela, a  $C$  njegov kapacitet koji ovisi o dužini. Što je kabel duži to je njegov kapacitet veći. Utjecaj tog kapaciteta se vidi na višim frekvencijama, jer se u osnovi radi i nisko propusnom filtru. Ako je kapacitet kabela relativno visok, tada će gornja granična frekvencija tog filtra biti niža i doći će do prigušivanja viših frekvencija. Kapacitet kabela se obično daje u faradima po metru.

## Riješeni zadaci

### Zadatak 2.1

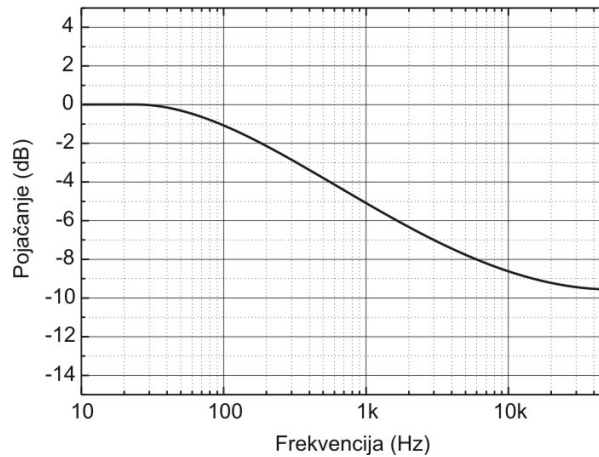
Treba nacrtati ovisnost pojačanja sklopa sa slike o frekvenciji.



Ovaj zadatak se može riješiti analitički koristeći matematičke jednadžbe, ali je to prekomplikirano. Ovaj zadatak se može riješiti metodom zanemarivanja.

U osnovi se radi o naponskom djelitelju. Na jako niskim frekvencijama impedancija kondenzatora je jako velika, puno veća od otpora  $R_2$  i otpora  $R_1$ , što znači da će struja koja teče kroz ovaj krug uzrokovati najveći pad napona na kondenzatoru, odnosno na serijskoj kombinaciji kondenzatora i otpora  $R_2$ . U to slučaju je pojačanje sklopa približno jedan (0 dB), jer je izlazni napon približno jednak ulaznom naponu.

Kako frekvencija raste tako je impedancija kondenzatora sve manja i na nekoj frekvenciji će serijska kombinacija otpora  $R_2$  i kondenzatora biti jednaka otporu  $R_1$ . Ta se frekvencija može izračunati prema jednakosti  $f = 1/(2\pi C \cdot (R_1 - R_2))$  i za ovaj slučaj iznosi oko 1,6 kHz. Na toj frekvenciji će izlazni napon biti duplo manji od ulaznog (-6 dB). Iznad ove frekvencije impedancija kondenzatora je sve manja, te na određenoj frekvenciji postaje zanemariva, tako da ostane naponski djelitelj s otporima  $R_1$  i  $R_2$ . U tom slučaju će izlazni signal biti 3 puta manji (-9,5 dB) od ulaznog signala:  $U_{izl} = U_{ul} \cdot R_2/(R_1 + R_2)$ . Frekvencija na kojoj se impedancija kondenzatora može zanemariti je kada njena vrijednost bude otprilike 10 puta manja od otpora  $R_2$ , a to je otprilike 16 kHz. Na slici je prikazana krivulja pojačanja sklopa u ovisnosti o frekvenciji.



**Zadatak 2.2**

Potrebno je konstruirati sklop s operacijskim pojačalima koji provodi slijedeću matematičku operaciju sa signalima  $U_1$ ,  $U_2$  i  $U_3$ :

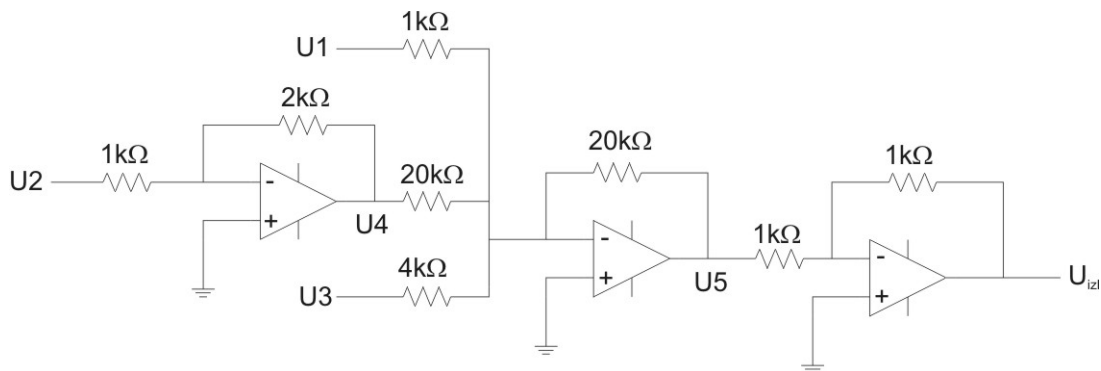
$$U_{izl} = (10 \cdot U_1 - U_2) \cdot 2 + 5 \cdot U_3$$

Ovaj zadatak se može riješiti na više načina, tako da je ovdje prikazan samo jedno moguće rješenje. Izraz za izlazni signal se može napisati kao:

$$U_{izl} = 20 \cdot U_1 - 2 \cdot U_2 + 5 \cdot U_3$$

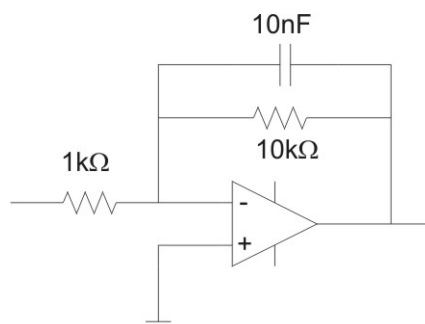
Na slici je prikazan konstruirani sklop sa slijedećim vrijednostima napona  $U_4$  i  $U_5$ :

$$U_4 = -2 \cdot U_2 \quad U_5 = -20 \cdot U_1 - U_4 - 5 \cdot U_3 \quad U_{izl} = -U_5$$



**Zadatak 2.3**

Nacrtati ovisnost pojačanja o frekvenciji sklopa sa slike.

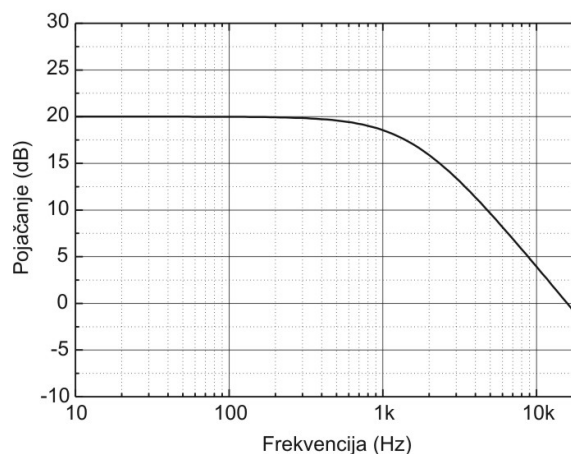


Pojačanje ovog sklopa se općenito može izračunati kao  $|A| = \frac{|Z|}{R}$  gdje su  $R_1=1 \text{ k}\Omega$ , a  $Z$  paralelna kombinacija kondenzatora i otpornika  $R_2=10 \text{ k}\Omega$ .

Ovaj zadatak se može riješiti i analitičkim postupkom, ali bi to zahtijevalo relativno komplicirane jednadžbe. On se može riješiti metodom zanemarivanja, koju smo već koristili u prethodnim primjerima.

Na jako niskim frekvencijama, impedancija kondenzatora je jako visoka, odnosno puno veća od otpornika od  $R_2$ , što znači da se može zanemariti, tako da se sklop sastoji od samo dva otpornika. U tom slučaju će apsolutno pojačanje sklopa biti 10, odnosno 20 dB. Kako raste frekvencija, tako se i smanjuje impedancija kondenzatora koja postaje usporediva s otporom  $R_2$ . Na nekoj frekvenciji su impedancija kondenzatora i otpor  $R_2$  jednaki. Iz toga se može izračunati granična frekvencija  $f = 1/(2\pi C \cdot R_2)$ . Iznad te frekvencije, impedancija kondenzatora postaje sve manje od otpora  $R_2$ , tako da na višim frekvencijama dominira, te na jako visokim frekvencijama predstavlja kratki spoj. Iznad granične frekvencije, u jednadžbi za apsolutno pojačanje sklopa dominira kondenzator umjesto otpora  $R_2$ , te pojačanje sklopa opada s frekvencijom sa 6 dB/okt.

Prema vrijednostima kondenzatora i otpora  $R_2$ , granična frekvencija je oko 1,6 kHz. Na slici je prikazana ovisnost pojačanja ovog sklopa o frekvenciji.



### 3. Obrada signala

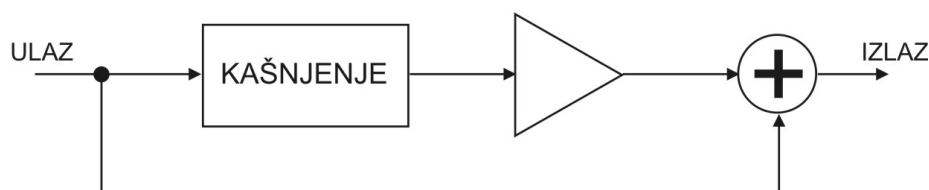
#### 3.1 Vremenska obrada signala

Vremenska obrada signala se odnosi na efekte u vremenskoj domeni. U to spadaju razni efekti bazirani na kašnjenju signala, a to su *delay* (kašnjenje), *reverb* (odjek), *chorus*, *flanger*, *phaser* i *time/pitch shifting*.

##### *Delay* (kašnjenje)

U ovom slučaju se radi o najjednostavnijem efektu, koji se iako je jednostavan može dobro iskoristiti ako se pametno upotrebljava. U osnovi je on baza za sve ostale efekte u vremenskoj domeni. Kašnjenje, kako samo ime kaže predstavlja reprodukciju istog signala nakon nekog vremena. Samo kašnjenje nema nikakvog smisla, ako taj ponovljeni signal nemamo s čime usporediti. Zbog toga se zakašnjeli signal uspoređuje s originalnim signalom. Dakle, nakon što je reproduciran originalni signal, njegova "kopija" se ponavlja nakon nekog vremena. Ako mijenjamo vrijeme do trenutka ponavljanja, broj ponavljanja i amplitudu ponovljenog signala mogu se dobiti razni efekti.

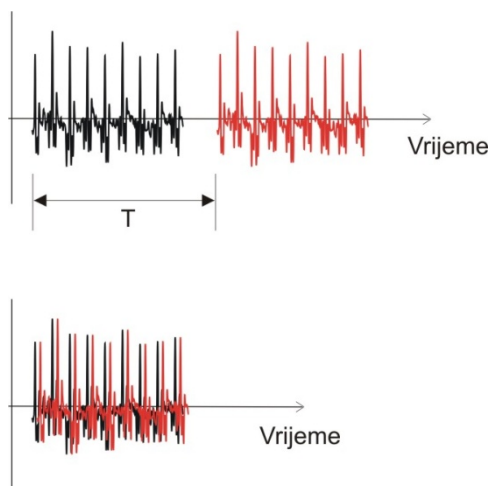
Efekt kašnjenja se može prikazati shemom na slici 3.1. Na njoj se vidi da se zakašnjeli ulazni signal, kojemu se može mijenjati vrijeme kašnjenja i amplituda zbraja s ulaznim signalom. Ovisno o vremenu kašnjenja i amplitudi se dobivaju razni efekti.



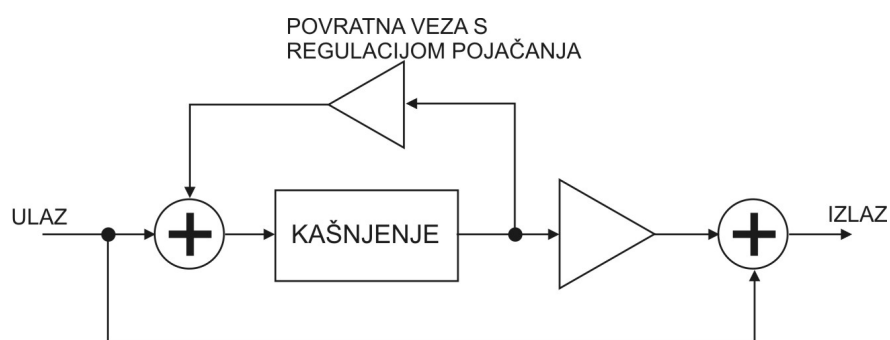
Slika 3.1 Osnovna shema efekta kašnjenja

Na slici 3.2 prikazan je primjer zakašnjelog signala za dva različita vremena kašnjenja, kratko i dugačko. Ako je vrijeme kašnjenja relativno kratko (nekoliko milisekundi) efekt se naziva *slapback*, a ako iznosi sekundu i više dobivamo *echo* efekt. Na ovoj slici je dan primjer kašnjenja samo jedne "kopije" ulaznog signala. Ako u sustav ubacimo povratnu vezu mogu se dobiti dodatni efekti.

Na slici 3.3 je prikazan shema uređaja za kašnjenje signala s povratnom vezom, kojemu se može regulirati pojačanje u grani povratne veze. Signal koji se vraća na početak se zbraja s ulaznim signalom i onda se taj signal ponovo kasni, da bi se tako zbrojeni signal preko povratne veze opet vraćao na početak i tako dalje dok se ne priguši. Većina profesionalnih uređaja za kašnjenje rabi ovu konfiguraciju.

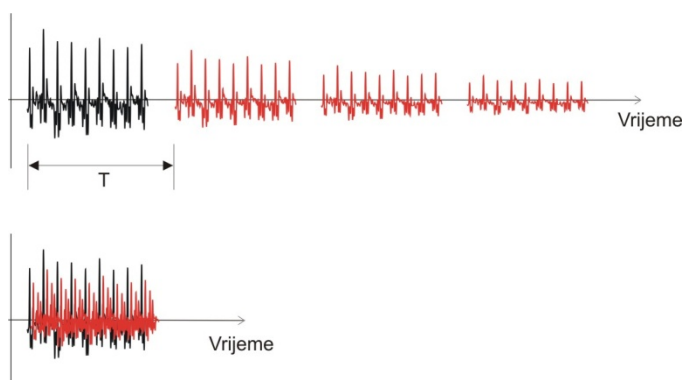


**Slika 3.2** Primjer kašnjenja signala s dugim i kratkim vremenom kašnjenja  $T$ .



**Slika 3.3** uređaj za kašnjenje signala s povratnom vezom.

Primjer jednog tako zakašnjelog signala prikazan je na slici 3.4. Uz dobro odabrano vrijeme kašnjenja i smanjenje amplitude zakašnjelog signala, moguće je dobiti odjek signala, s kojim se mogu simulirati razne prostorije. U principu ponavljanje signala u ovom uređaju traje dok se ne priguši, odnosno dok ne postane dovoljno tih.

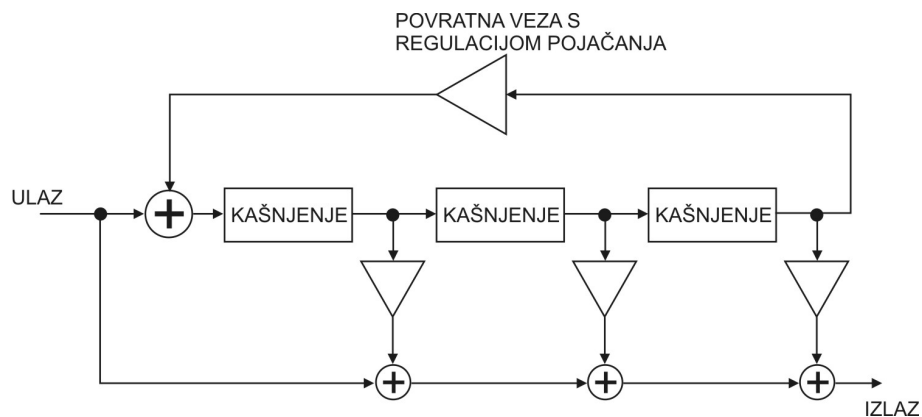


**Slika 3.4** Primjer kašnjenja signala u uređaju s povratnom vezom.

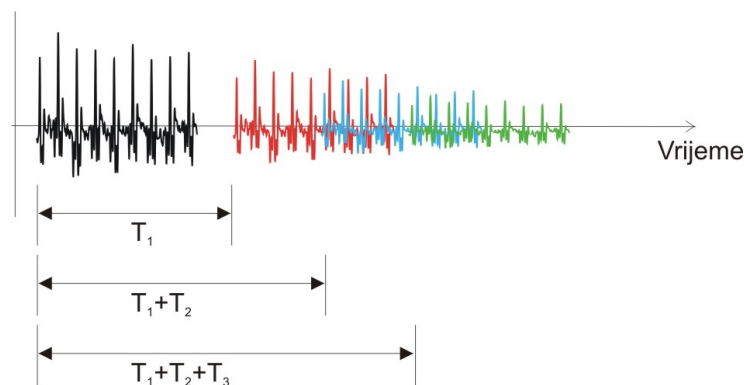
Kao što je spomenuto, kašnjenje signala je vrlo koristan efekt, ako se pravilno rabi. Najčešće se rabi za "popunjavanje" zvuka instrumenata. Ako na pozornici ili u studiju imamo na primjer samo jednu gitaru, uz pravilni odabir vremena kašnjenja broj

instrumenata se može povećati, i slušatelj dobije dojam da se na pozornici nalazi više gitara. U tom slučaju se rabi vrijeme kašnjenja do 100 ms. Kako se povećava vrijeme kašnjenja, više se ne radi o suptilnom efektu, nego se vrlo lako mogu razaznati originalni i ponovljeni signal. Ako vrijeme kašnjenja tako podesimo da odgovara ritmu, odnosno taktu sviranja, može se postići efekt popunjavanja nota. Na taj način se glazba može obogaćivati, kao da ubacujemo nove note.

Efekt kašnjenja se može dodatno unaprijediti s *multi-tap* kašnjenjem, kod kojeg postoji više linija za kašnjenje, a kojima se može odvojeno regulirati pojačanje. Na slici 3.5 dana je shema jednog takvog uređaja, koji omogućuje više fleksibilnosti, a rabi se za kompleksnije sheme reprodukcije. Ovakvi uređaji se najčešće rabe kod naknadne obrade signala, a rjeđe u sustavima za ozvučavanje događanja u živo. Na slici 3.6 prikazan je primjer multi-tap kašnjenja signala.

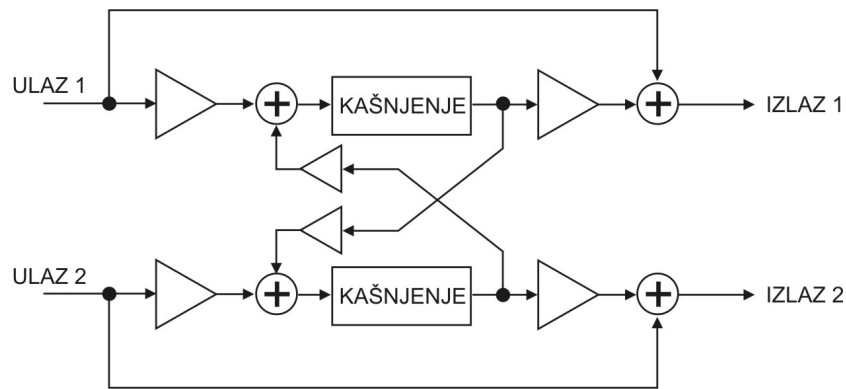


Slika 3.5 Uređaj za multi-tap kašnjenje



Slika 3.6 Primjer multi-tap kašnjenja.

Osim u mono signalu, kašnjenje se može primijeniti na stereo signal. Na taj način se mogu postići razni prostorni efekti, kao što je na primjer ping-pong kašnjenje. Kao i multi-tap kašnjenje, i kašnjenje između dva kanala se rabi samo u specijalnim slučajevima u naknadnoj obradi signala, a rijetko se koristi kod izvedbi u živo. Slika 3.7 prikazuje shemu uređaja za kašnjenje u stereo signalu.

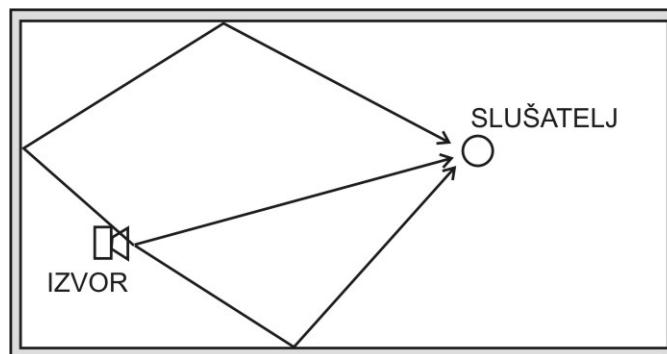


**Slika 3.7** Uređaj za kašnjenje u stereo signalu.

Implementacija kašnjenja se danas bazira na digitalnim uređajima. U početku su se koristili analogni uređaji u obliku uređaja za reprodukciju magnetskih traka s više glava za čitanje na različitim položajima. Ovisno o njihovom razmaku i brzini reprodukcije trake, dobivala su se različita vremena kašnjenja. Digitalni uređaji se baziraju na DSP sučelju uz određene memorije ili kružne buffer memorije.

### *Reverb (odjek)*

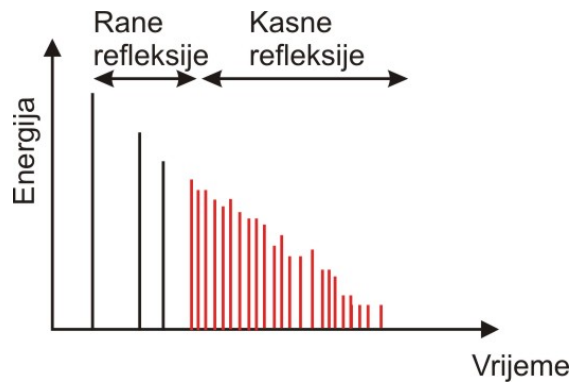
Efekt odjeka se bazira na širenju zvuka u prostoriji. Ako se u prostoriji nalazi izvor zvuka i slušatelj, onda će do slušatelja osim direktnog zvuka dolaziti i reflektirani zvuk koji se reflektira od zidova, poda i stropa. Te refleksije mogu biti rane i kasne, ovisno o tome koliko puta se signal reflektirao od određene površine. Slika 3.8 prikazuje shemu jedne takve situacije u nekoj prostoriji.



**Slika 3.8** Primjer refleksija u prostoriji.

Način refleksija, količina i njihov intenzitet ovisi o karakteristikama prostorije. Ako se na zidovima nalaze apsorpcijski materijali, onda će refleksije biti prigušene. Također, apsorpcija zvučne energije tih materijala ovisi o frekvenciji signala, tako da će odjek ovisiti i o frekvenciji. Osim toga važan je i oblik prostorije, te njen volumen. Kada se svi ti signali zbroje na mjestu slušatelja, on to percipira kao odjek zvučne energije. Na slici 3.9 prikazan je vremenski dijagram tako percipiranog zvuka na mjestu slušatelja. Dakle, na mjestu slušatelja se u vrlo kratkom vremenu pojavljuju zakašnjeni i ponovljeni signali, a vrijeme kašnjenja se kreće do 300 ms.





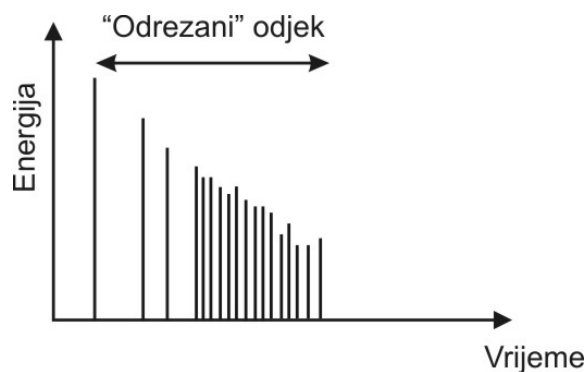
**Slika 3.9** Vremenski dijagram širenja zvuka u prostoriji.

Kao što se može vidjeti na tom dijagramu, refleksije se pojavljuju u različito vrijeme i uz različiti intenzitet, te se mogu podijeliti na rane i kasne refleksije. Odnos vremena pojave ranih i kasnih refleksija, te njihov intenzitet je određen karakteristikama prostorije. To znači da mi, regulacijom kašnjenja i glasnoće originalnog signala može dobiti dojam da se originalni signal reproducirao u nekoj prostoriji. Tako dodani efekt se naziva "umjetni odjek". Razlika između odjeka i echo efekta je u vremenu kašnjenja. Kod echo efekta vrijeme kašnjenja je točno definirano i uvijek je jednako za svaki ponovljeni signal. Kod odjeka, vrijeme kašnjenja se stalno mijenja ovisno o frekvenciji signala, karakteristikama prostorije, i drugim parametrima. Osim toga vrijeme kašnjenja kod odjeka je vrlo kratko, ovisno o vrsti refleksija, dok je kod echo efekta vrijeme kašnjenja relativno veliko i može trajati nekoliko sekundi.

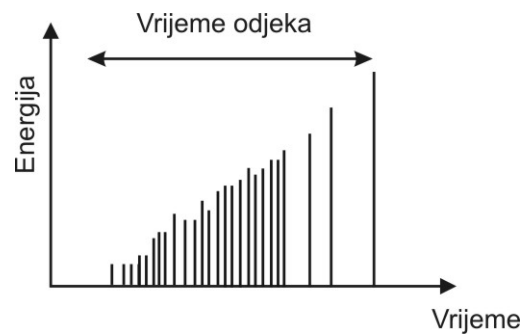
Dodavanjem umjetnog odjeka možemo poboljšati kvalitetu reprodukcije. Zvuk koji je reproduciran bez nikakvog odjeka djeluje suho i umjetno. Ljudsko uho je naviklo na odjek i šum, tako da je zvuk snimljen u gluhoj komori, gdje nema nikakvog odjeka, neugodan za slušanje. Dodavanjem malog odjeka može se uvelike unaprijediti kvaliteta slušanja. U tu svrhu se rabe razne vrste oblika umjetnog odjeka.

Prvi od njih je *gate reverb*, kod kojega je vrijeme odjeka fiksno. Dakle, vrijeme odjeka se podesi na neku vrijednost i svaki signal koji prođe kroz takav uređaj će biti zakašnjen vrlo kratko vrijeme, biti će ponavljan puno puta, ali će vrijeme trajanja takvog signala biti ograničeno. Slika 3.10 prikazuje primjer *gate reverb* efekta. Gate reverb efekt se najčešće rabi na bubnjevima.

Drugi efekt na bazi odjeka je *reverse reverb*, koji kako ime kaže označava efekt kod kojega reflektirani signali s vremenom postaju glasniji. I ovaj efekt se rabi za poboljšanje kvalitete reprodukcije. Slika 3.11 prikazuje primjer takvog efekta.



**Slika 3.10** Primjer gate reverb efekta.



**Slika 3.11** Primjer reverse reverb efekta.

Za namještanje efekta odjeka rabe se razni parametri, koji se mogu naći na profesionalnim uređajima. Redom to su:

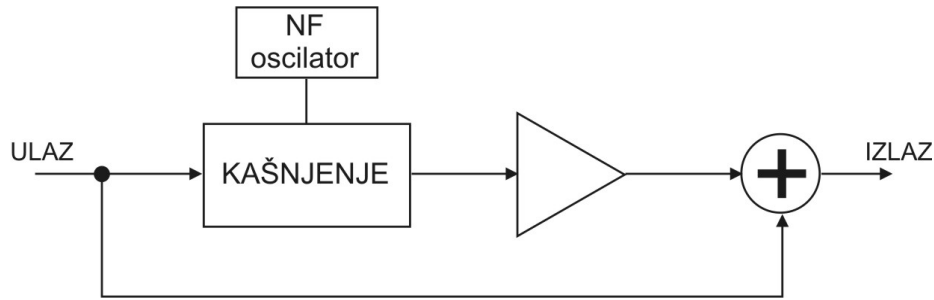
- Predelay – određuje početno kašnjenje; vrijeme ranih i kasnih refleksija
- Reverb decay – trajanje signala nakon prestanka reprodukcije izvora signala
- Gate time – vrijeme trajanja odjeka
- Gate decay time – brzina opadanja intenziteta signala
- Gate threshold – prekid odjeka prema određenoj razini signala, a ne vremenu.

Implementacija efekta odjeka se u početku provodila analognim uređajima i posebnim mehaničkim pretvaračima. U početku se do radilo u odječnim komorama, odnosno prostorijama koje su tako konstruirane da imaju veliko vrijeme odjeka. U prvim gitarskim pojačalima, za dobivanje odjeka su se rabile opruge s posebnim električko-mehaničkim pretvaračima. Električni signal iz gitare se dovodio do pretvarača koji je struju pretvarao u mehaničko titranje opruge. Na drugom kraju opruge se nalazio mehaničko-električki pretvarač koji je titranje opruge ponovo pretvarao u električku struju. Vrijeme odjeka i intenzitet odjeka ovise o karakteristikama opruge. Primjenom različitih opruga, te njihovim prigušenjem moglo se mijenjati parametre odjeka. Na sličan način su se rabile i odječne ploče, koje su prenosile mehaničke titraje s jednog kraja na drugi.

Danas se u većini slučajeva rabe digitalni procesori s memorijama, koji omogućuju puno više fleksibilnosti i nude više parametara za namještanje.

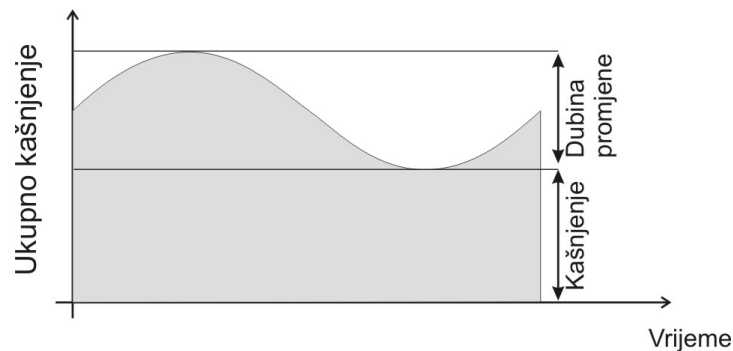
### *Chorus*

Još jedan efekt koji je baziran na kašnjenju signala. U doslovnom prijevodu njegov naziv znači "zbor", a koristi se za obogaćivanje zvuka, "dodavanjem" vokala ili instrumenata. Kada slušamo zbor kako pjeva, svi pjevači ne pjevaju u glas, nego postoje mala kašnjenja između pojedinih pjevača, koja su čas kratka, čas duga ili ih nema. Dakle, kašnjenje se mijenja u nekom ritmu ili slučajno. Na tom principu radi *chorus* efekt. Vrijeme kašnjenja je relativno kratko, između 20 ms i 30 ms, s time da se vrijeme kašnjenja mijenja u ritmu neke frekvencije, recimo 3 Hz. Shema uređaja za chorus efekt je dana na slici 3.12. Na element za kašnjenje je spojen NF oscilator, koji mijenja vrijeme kašnjenja u ritmu određene frekvencije. Dakle vrijeme kašnjenja je u jednom trenutku 20 ms, pa raste, dođe do 30 ms, pa pada i opet se vrati na 20 ms.



**Slika 3.12** Shema uređaja za chorus efekt.

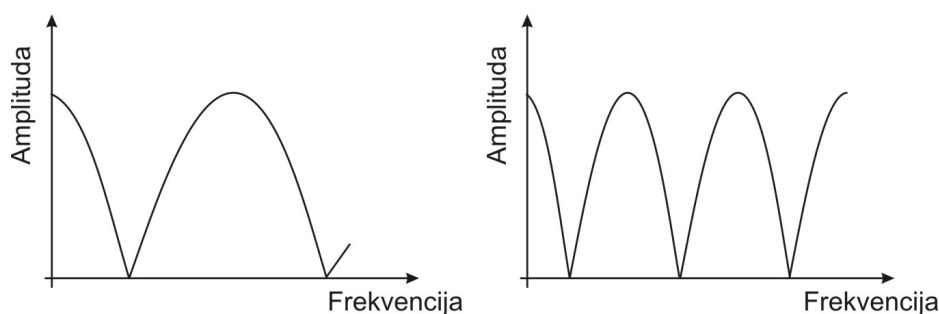
Slika 3.13 prikazuje shemu kašnjenja chorus efekta. Parametri koji se mogu mijenjati su početno kašnjenje, dubina promjene kašnjenja, te oblik signala promjene kašnjenja. Signal promjene kašnjenja može biti sinusni, pilasti ili logaritamski. Dodavanjem više linija za kašnjenje, može se povećati broj "glasova", odnosno zakašnjelih signala, te dodatno obogatiti zvuk. Isti efekt se može primijeniti na stereo signal, kod kojega se postiže "širi" zvuk, odnosno dojam prostornosti.



**Slika 3.13** Shema promjene kašnjenja kod chorus efekta sa sinusnim signalom.

### *Flanger*

Flanger efekt se bazira na kratkom kašnjenju signala od 1 ms do 10 ms. Shema uređaja odgovara osnovnoj shemi za kašnjenje signala. Ovako kratko kašnjenje signala uzrokuje da na određenim frekvencijama i višekratnicima tih frekvencija dolazi do poništavanja signala. Ako signal zakasnimo za određeno kratko vrijeme i zbrojimo s ulaznim signalom, ta dva signala će biti u protufazi na frekvenciji čiji period odgovara vremenu kašnjenja. Ako je amplituda ta dva signala jednaka, poništavanje će biti potpuno. S druge strane ako je amplituda zakašnjelog signala niža, neće doći do potpunog poništavanja nego samo do prigušenja na određenoj frekvenciji. Slika 3.14 prikazuje frekvencijsku karakteristiku flanger uređaja, za razna vremena kašnjenja. Ovaj oblik frekvencijske karakteristike odgovara takozvanom "češljastom" filtru.

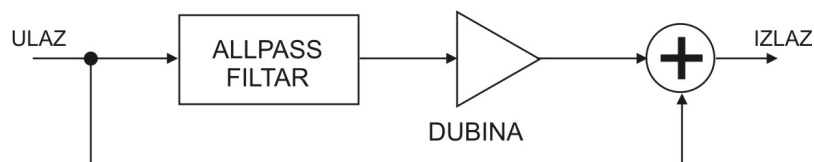


**Slika 3.14** Frekvencijska karakteristika flanger uređaja.

Parametri flanger efekta uključuju dubinu promjene vremena kašnjenja, oblik signala s kojim reguliramo promjenu kašnjenja te naravno početno vrijeme kašnjenja. Ako odaberemo duže kašnjenje, poništavanje će se pojaviti na nižoj frekvenciji, a ako odaberemo kraće vrijeme kašnjenja, poništavanje će se pojaviti na višoj frekvenciji. S dodavanjem povratne veze u uređaj za kašnjenje mogu se postići dodatni efekti, a ponekad se koristi i stereo flanger efekt.

### Phaser

Phaser efekt je sličan flanger efektu, samo u ovom slučaju nema kašnjenja signala, barem ne u pravom smislu riječi. Slika 3.15 prikazuje shemu phaser uređaja. Ulazni signal se propušta kroz široko pojasni filter, koji ima ravnu frekvencijsku karakteristiku pojačanja, ali mu se faza linearno mijenja s frekvencijom. Propuštanjem signala kroz takav filter doći će do promjene faze na određenim frekvencijama, a kada se takav signal zbroji s ulaznim doći će do prigušenja na tim frekvencijama.



**Slika 3.15** Shema phaser uređaja.

Kao i kod flanger efekta može se mijenjati dubina promjene, odnosno razina poništavanja, te brzina (ritam) pomicanja udubina. S povratnom vezom se mogu dobiti dodatni efekti, kao i kod stereo signala.

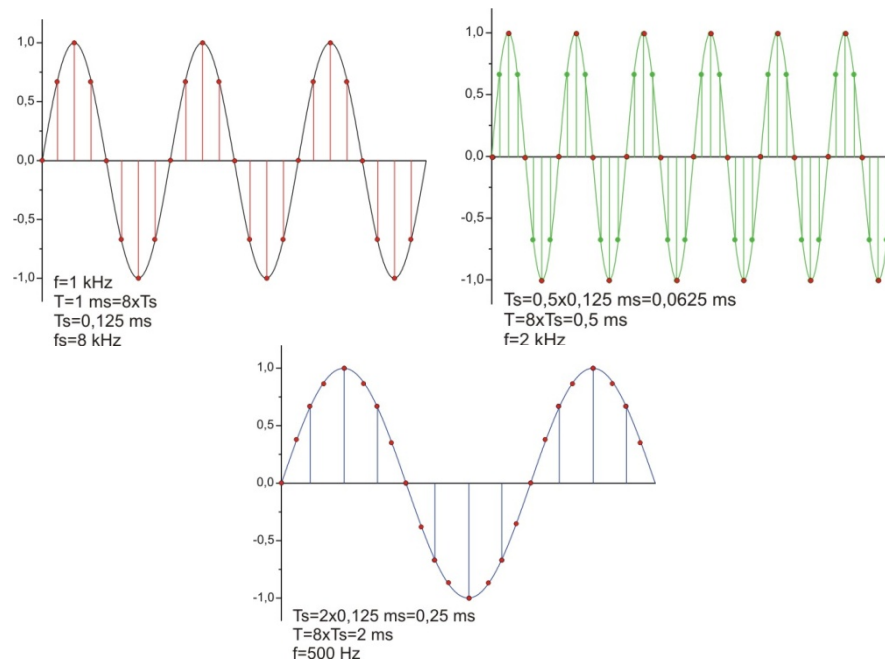
### Vremenski/frekvencijski pomak

Još jedan efekt koji je baziran na promjenama u vremenskoj domeni, ali se u nekim slučajevima promjena vrši i u frekvencijskoj domeni. U engleskoj terminologiji taj efekt se naziva *time/pitch shifting*.

Vremenski pomak se odnosi na efekt promjene trajanja signala bez promjene spektra. Na primjer ako hoćemo ubrzati ritam, odnosno takt sviranja instrumenta, a da ne promijenimo oktavu sviranja, koristiti ćemo ovaj efekt. Ovaj efekt rabe DJ-i kada žele "umiksati" dvije pjesme različitog ritma. Da bi "umiksavanje" bilo dobro, ritam (BPM –

beats per minute) te dvije pjesme mora biti ujednačen, ali ne smije doći do promjene spektra audio signala, odnosno promjene harmonijskog odnosa. Da bi se to moglo obaviti, potrebno je prepoznati frekvenciju ritma i spektar signala. Zbog toga se signal prebacuje u frekvencijsku domenu (STFT – Short Time Fourier Transform) gdje se detektira frekvencija ritma, koja je obično na niskim frekvencija, te se promijenit i signal se vraća u vremensku domenu.

Frekvencijski pomak se odnosi na promjenu spektra (ali uz zadržavanje harmonijskog odnosa) signala uz zadržavanje vremenskog trajanja. Na primjer, kao kada svirač zadrži ritam sviranja, ali svira u višoj ili nižoj oktavi. Frekvencijski pomak se može vrlo jednostavno postići promjenom frekvencije uzorkovanja signala kako je prikazano na slici 3.16.



**Slika 3.16** Shema promjene spektra signala promjenom frekvencije uzorkovanja

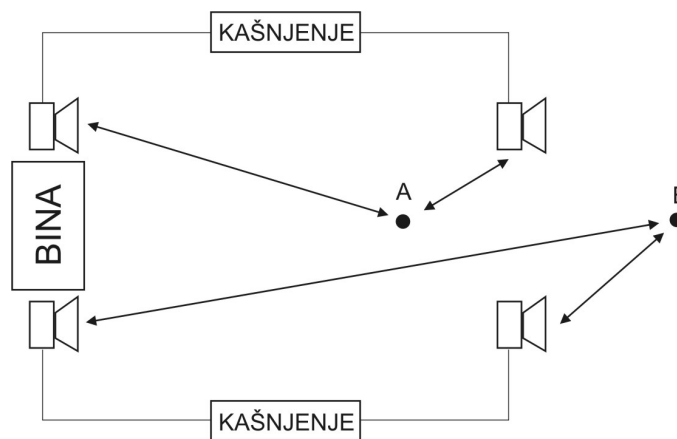
Na primjer, ako imamo signal frekvencije 1 kHz, koji je uzorkovan s frekvencijom od 8 kHz, vrijeme između uzoraka će biti 0,125 ms. Jedan period signala će se sastojati od 8 uzoraka. Ako promijenimo vrijeme trajanja između uzoraka za pola na 0,0625 ms, osam uzoraka će dati frekvenciju signala od 2 kHz. Ako s druge strane povećamo vrijeme između uzoraka za dva puta na 0,25 ms, osam uzoraka će dati frekvenciju signala od 500 Hz. Dakle, ako imamo spremljene uzorke nekog signala, promjenom vremena između pojedinih uzoraka možemo mijenjati frekvenciju signala. Nedostatak ove metode je u tome što se na isti način mijenja i frekvencija ritma, odnosno takta sviranja.

Zbog toga se rabe složeniji uređaji kao što je *Phase vocoder*, koji cijelu obradu signala prebacuje u frekvencijsku domenu sa već spomenutim STFT postupkom. U frekvencijskoj domeni dolazi do promjene amplituda i faza spektralnih komponenata, prepoznavanja frekvencije ritma, a može se promijeniti i frekvencija uzorkovanja spektra. Nakon obrade signal se vraća u vremensku domenu.

Osim spomenutog uređaja, za ovakvu obradu signala se koristi i *wavelet* analiza, kod koje se signal dijeli na male odsječke na kojima se vrši filtriranje. Nakon toga se na pojedinim filtriranim odsječcima vrši promjena spektra, a nakon toga se vremenski odsječci zbrajaju i slaže se novi signal.

*Kašnjenje – percepcija usmjerenosti*

Kašnjenje signala se rabi i u nekim drugim slučajevima gdje se ne žele postići razni efekti, nego se žele kompenzirati problemi nastali zbog različitog puta dolaska zvučnog vala do slušatelja. Na primjer, u slučajevima velikih koncerata ili ozvučenja stadiona, za ozvučavanje se rabe zvučnici pored bine, ali i zvučnici koji su postavljeni dalje od bine kako bi se pokrio dodatni prostor. Na slici 3.17 je prikazana jedna takva konfiguracija. Slušatelji na mjestima A i B će osim zvuka iz zvučnika s bine čuti i zvuk koji dolazi s udaljenih zvučnika. Radi kvalitete slušanja, slušatelj uvijek mora imati dojam da zvuk dolazi s bine, a ne sa strane. Zbog toga se signal koji dolazi do vanjskih zvučnika mora malo zakasnuti.



**Slika 3.17** Primjer ozvučavanja koncerta.

Ljudski mozak se za određivanje smjera dolaska zvučnog vala koristi raznim metodama i efektima. Prvi i osnovni je oblik ljudskog uha, koje nije ništa drugo nego mehanički filter. Usmjerna karakteristika ljudskog uha se mijenja ovisno o tome kako okrećemo glavu. Mozak na osnovu tih informacija o promjeni frekvencijske karakteristike uha i iskustva prijašnjeg slušanja određuje smjer dolaska vala. Osim toga koristi i druge efekte:

- Odnos direktne i reflektirane energije
- Ako postoji kašnjenje od 30 ms prema originalnom signalu dobiva se echo efekt
- Ako je drugi signal 10 dB glasniji od prvog dobiva se echo efekt
- Hassov efekt – ako je drugi zvuk unutar 10 dB od prvog i kašnjenje je unutar 30 ms, pomak zvučne slike je prema izvoru (smjeru dolaska vala)
- Ako je drugi zvuk za 10 dB glasniji od prvog, dobiva se dojam prostornog proširenja zvuka

Na velikim koncertima to treba uzeti u obzir. Ako je brzina zvuka oko 334 m/s, to znači da će zvuk za 30 ms prijeći 10 metara, što nije malo. Osim toga s udaljenosti pada i intenzitet zvuka po principu 6 dB za dvostruku udaljenost. Zbog toga se signal do stražnjih zvučnika mora malo zakasnuti kako bi signal sa bine i signal sa stražnjih zvučnika do slušatelja stigli unutar 30 ms. A ako im je intenzitet unutar 10 dB, onda će slušatelj imati osjećaj da zvuk dolazi sprijeda, iako je zvuk iz stražnjih zvučnika nešto glasniji. Na primjer, ako je na slici 3.17 u točki A zvuk iz drugih zvučnika glasniji za 6 dB od prednjih i kasni 5 ms, slušatelj će imati osjećaj da zvuk dolazi s bine.

### Uređaj za efekte

Slika 3.18 prikazuje jedan digitalni uređaj za efekte, koji u sebi objedinjuje sve spomenute efekte.



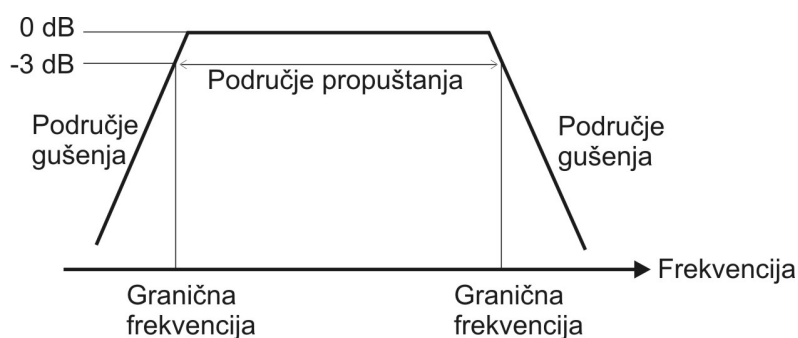
Slika 3.18 Digitalni procesor Yamaha SPX2000.

### 3.2 Frekvencijska obrada signala

Frekvencijska obrada audio signala se bazira na filtrima. Filtar je sklop ili uređaj koji obrađuje signale na osnovi njihove frekvencije. Dakle, oblik spektra signala koji uđe u filtar i signala koji izađe iz filtra neće biti jednak. Dakle, filtar može pojačavati ili prigušivati signale određene frekvencije ili određene grupe frekvencija. Prema području propuštanja i gušenja, filtri se dijele na četiri osnovne vrste:

- Pojasni propust – propuštanje određenog frekvencijskog područja (*bandpass*)
- Pojasna brana – prigušivanje određenog frekvencijskog područja (*bandreject*)
- Nisko-propusni filtar – propuštanje signala frekvencija ispod neke granične frekvencije (*low pass*)
- Visoko-propusni filtar – propuštanje signala frekvencija iznad neke granične frekvencije (*high pass*)

Slika 3.19 prikazuje osnovne oznake frekvencijske karakteristike filtra. Frekvencijska karakteristika filtra se sastoji od područja propuštanja (*bandwidth*) i područja gušenja. Područje propuštanja je područje frekvencija u kojem signali tih frekvencija prolaze kroz filtar bez promjene razine signala (pojačanje 0 dB). Područje gušenja je područje frekvencija u kojem signali tih frekvencija prolaze kroz filtar uz promjenu razine signala (pojačanje < 0 dB). Područje propuštanja je ograničeno s donjom i gornjom graničnom frekvencijom. Na tim frekvencijama pojačanje signala padne za 3 dB u odnosu na signale u području propuštanja (-3 dB točke). Kod idealnih filtara, prelazak iz područja propuštanja u područje gušenja bi bio brz. Kod realnih filtara taj prijelaz je blag, odnosno pojačanje se naglo ne mijenja. Taj prijelaz iz područja propuštanja u područje gušenja je određen padom (porastom) filtra, a taj pad određuje red filtra. Središnja frekvencija područja propuštanja je predstavljena geometrijskom sredinom graničnih frekvencija  $f = \sqrt{f_{dg} \cdot f_{gg}}$ .



Slika 3.19 Osnovne oznake frekvencijske karakteristike filtra.

### Osnovna analiza filtara

Najjednostavniji nisko-propusni filter je RC sklop, koji će nam poslužiti za analizu filtara. Njegova prijenosna karakteristika se može napisati kao:

$$A(s) = \frac{u_{izl}}{u_{ul}} = \frac{1}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{1}{1 + sRC} \quad \text{gdje je } s = j\omega$$

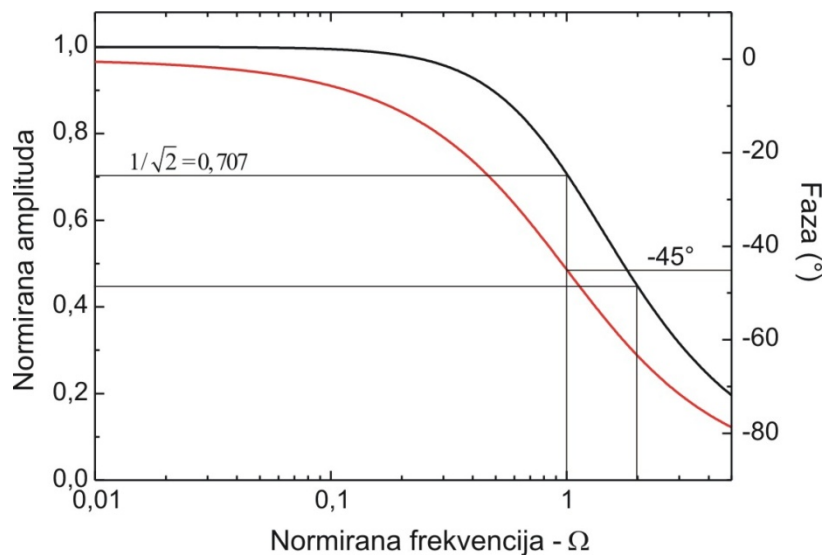
Ako prijenosnu funkciju normaliziramo prema graničnoj frekvenciji sklopa  $\omega_g = \frac{1}{RC}$  dolazimo do sljedećeg:

$$p = \frac{s}{\omega_g} = j \frac{\omega}{\omega_g} = j\Omega, \quad A(p) = \frac{1}{1 + p}$$

Odnosno modul i faza prijenosne karakteristike filtra kao funkcije normalizirane frekvencije se mogu napisati kao:

$$|A| = \frac{1}{\sqrt{1 + \Omega^2}}, \quad \varphi = \arctan(-\Omega) \quad [rad]$$

Slika 3.20 prikazuje modul i fazu prijenosne karakteristike filtra. Vidljivo je da je pojačanje sklopa za frekvencije ispod granične frekvencije ( $\Omega=1$ ) veće od 0,707 (-3 dB), a da pojačanje iznad te frekvencije opada. Prijelaz iz područja propuštanja u područje gušenja nije oštar, nego blag. Isto vrijedi za promjenu faze.



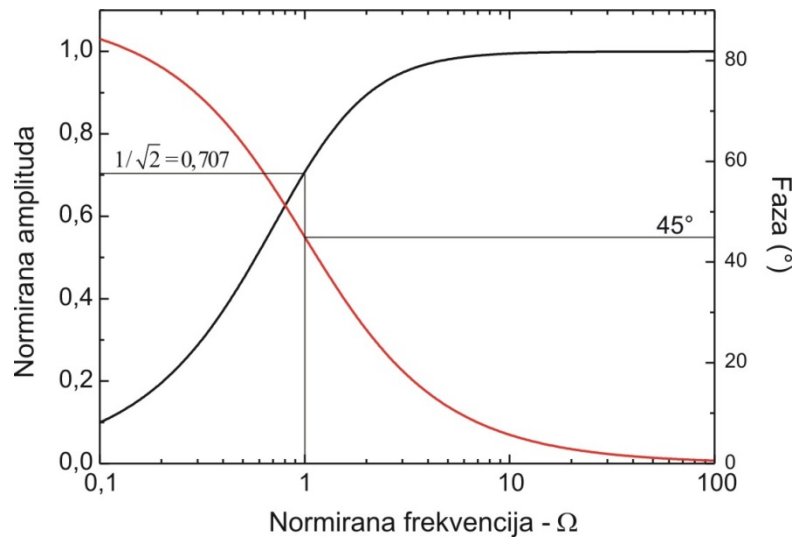
**Slika 3.20** Modul i faza prijenosne karakteristike nisko-propusnog RC filtra (crna crta – modul; crvena crta – faza).

Na jednaki način se može izračunati prijenosna frekvencijska karakteristika CR kombinacije, koja predstavlja visoko-propusni filter. Nakon kratkog računa dobije se da su modul i faza prijenosne karakteristike CR filtra:



$$|A| = \frac{\Omega}{\sqrt{1+\Omega^2}}, \quad \varphi = \arctan\left(\frac{1}{\Omega}\right) \quad [rad]$$

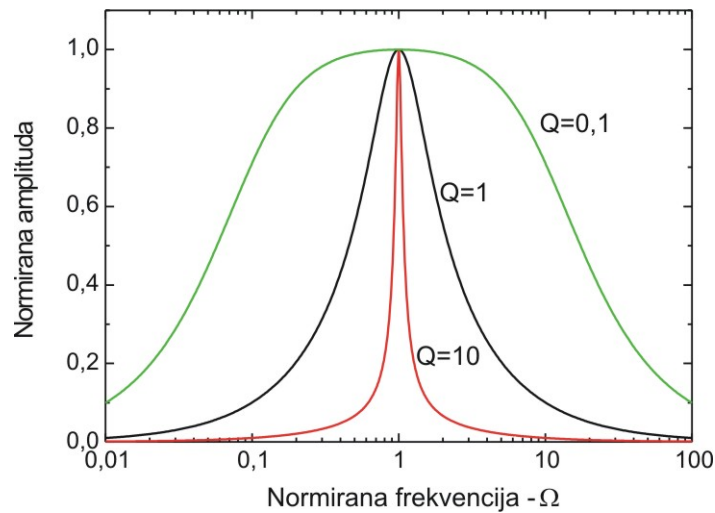
Slika 3.21 prikazuje modul i fazu prijenosne karakteristike CR filtra.



**Slika 3.21** Modul (crna crta) i faza (crvena crta) prijenosne karakteristike visokopropusnog CR-filtra.

Ako u seriju spojimo kondenzator i induktivitet, a otpornik služi kao opterećenje, može se dobiti uskopojasni propusni filter. Na slici 3.22 prikazana je prijenosna karakteristika takvog filtra, a iz nje je vidljivo da će pojačanje biti 1 (0 dB) samo na određenoj frekvenciji ili uskom dijelu frekvencijskog pojasa. Frekvencija je određena vrijednostima kapaciteta i induktiviteta, a širina vrijednosti otpora. Nakon kraćeg računa dobije se izraz za modul prijenosne karakteristike RLC filtra prema normaliziranoj frekvenciji.

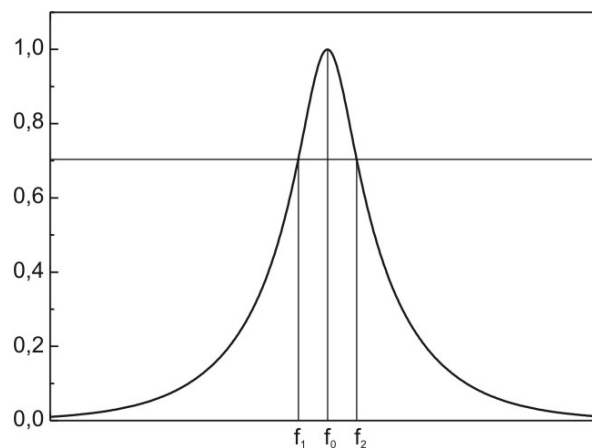
$$|A| = \frac{\Omega \frac{1}{Q}}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + \left(\Omega \frac{1}{Q}\right)^2}}, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad Q = \frac{\omega_0 L}{R} \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_0}$$



**Slika 3.22** Prijenosna karakteristika RLC filtra.

$Q$  faktor predstavlja takozvani faktor dobrote, ili faktor prigušenja. Sa slike 3.22 se može vidjeti da što je faktor dobrote veći to je širina pojasa propuštanja filtra uža, a kako se faktor dobrote smanjuje, to je širina pojasa propuštanja filtra veća. Faktor dobrote se može očitati iz same prijenosne karakteristike. Ako se očitaju frekvencije ( $f_1$  i  $f_2$ ) na kojima pojačanje u odnosu na pojačanje na središnjoj frekvenciji  $f_0$  padne za 3 dB, kako je prikazano na slici 3.23,  $Q$  faktor se može izračunati prema slijedećoj jednakosti:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$



**Slika 3.23** Izračunavanje faktora dobrote iz prijenosne karakteristike filtra.

Ako se realni RC filtar s prijenosnom karakteristikom na slici 3.20 usporedi s idealnim filtrom, vidljivo je nekoliko značajnih razlika. Prvo, pojačanje propusnog dijela počne padati puno prije granične frekvencije filtra. Drugo, prijelaz između područja propuštanja u područje gušenja nije oštar, nego postoji pad karakteristike. Fazna karakteristika nije linearna neko se pomak u fazi mijenja s frekvencijom. To su tri osnovne karakteristike prema kojima se dobivaju različite vrste filtara.

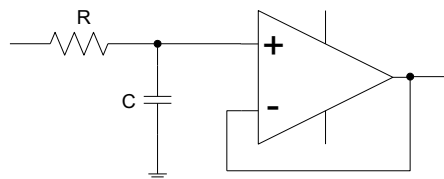
Dakle, možemo utjecati na najveće moguće ravno pojačanje u području propuštanja, na brzinu prijelaza između područja propuštanja i područja gušenja, te na oblik fazne karakteristike.

### Aktivni filtri

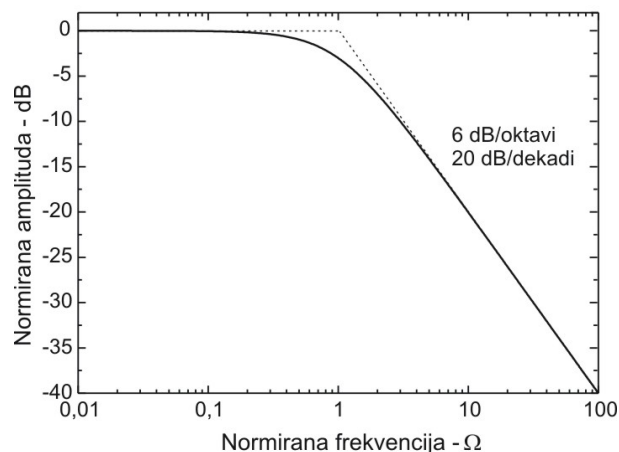
Aktivni filtri su takvi filtri kojima se pojačanje propusnog dijela može namještati. Kod pasivnih filtara pojačanje u tom dijelu je bilo 1 (0 dB). Kod aktivnih filtara mi možemo regulirati to pojačanje. Osim toga, aktivni filtri, koji su ostvareni s operacijskim pojačalima mogu se konstruirati samo s otpornicima i kondenzatorima, a to su komponente koje zauzimaju manje mjesta i jeftinije su. Prijenosna karakteristika aktivnih filtara ne ovisi o slijedećem stupnju, odnosno ulazni otpor aktivnog filtra je velik, a izlazni otpor je mali. Aktivni filtri omogućuju postizanje prijenosnih karakteristika koje nisu moguće s pasivnim filtrima.

Nedostatak aktivnih filtara je u tome što trebaju napajanje, a napon napajanja ograničava maksimalni izlazni napon. S druge strane aktivni elementi unose šum.

Najjednostavniji aktivni filter je prikazan na slici 3.24 i sastoji se od RC kombinacije i operacijskog pojačala. Njegova prijenosna karakteristika je prikazana na slici 3.25. Pad ovog filtra prvog reda je 6 dB/oktavi, odnosno 20 dB/dekadi.

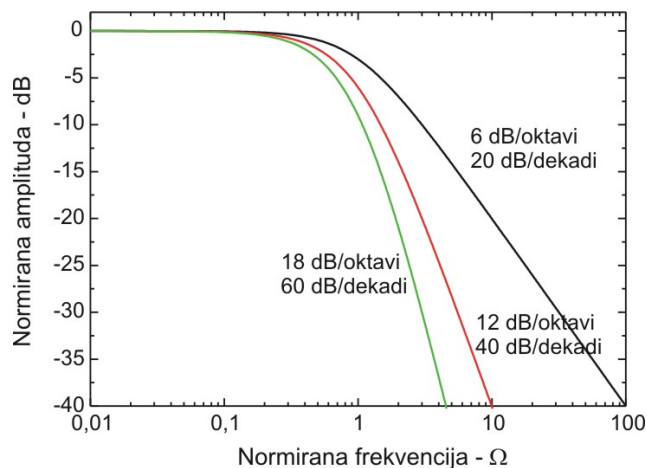


Slika 3.24 Najjednostavniji RC aktivni filter.



Slika 3.25 Prijenosna karakteristika nisko-propusnog aktivnog filtra prvog reda.

Ako želimo dobiti "brži" pad filtra, možemo u kaskadu spojiti dva filtra prvog reda, kako bi se dobio filter drugog reda. Dakle, ako želimo još više povećati brzinu pada pojačanja u kaskadu možemo spojiti proizvoljni broj filtara prvog reda. Slika 3.26 prikazuje prijenosne karakteristike filtara prvog (6 dB/okt), drugog(12 dB/okt) i trećeg reda (18 dB/okt).



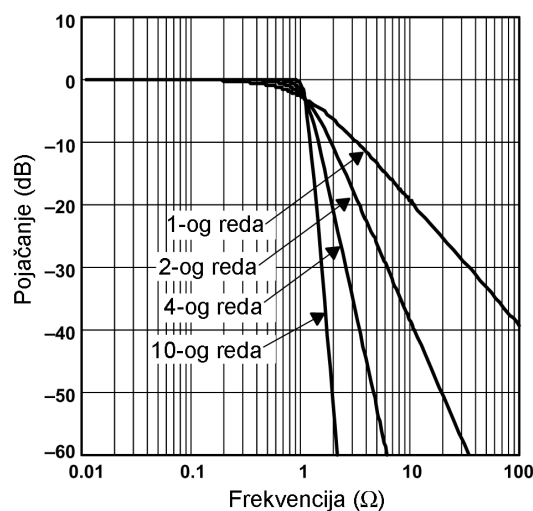
**Slika 3.26** Prijenosne karakteristike filtara prvog, drugog i trećeg reda.

Prijenosna funkcija tako spojenih filtara prvog reda se može napisati kao:

$$A(s) = \frac{1}{(1 + \alpha_1 s)(1 + \alpha_2 s)(1 + \alpha_3 s) \dots}$$

Promjenom koeficijenata  $\alpha$  pojedinog filtra mogu se dobiti različite prijenosne karakteristike filtara, a one se mogu podijeliti na tri osnovna filtra različitih karakteristika.

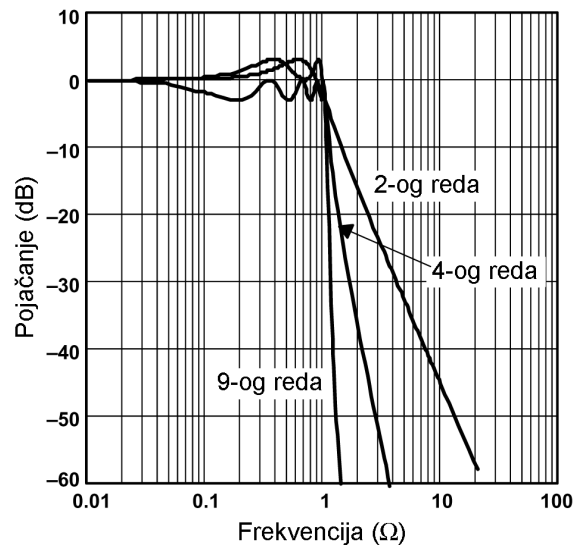
**Butterworth filtri** su filtri čija je prijenosna karakteristika optimizirana za najveće ravno pojačanje u području propuštanja. Kod ovih filtara je cilj postići da pojačanje ne počne opadati puno prije granične frekvencije, nego tik uz nju. Zbog toga se ovi filtri najčešće rabe u A/D pretvaračima kao anti-aliasing filtri. Slika 3.27 prikazuje prijenosnu karakteristiku takvih filtara.



**Slika 3.27** Butterworth filtar.

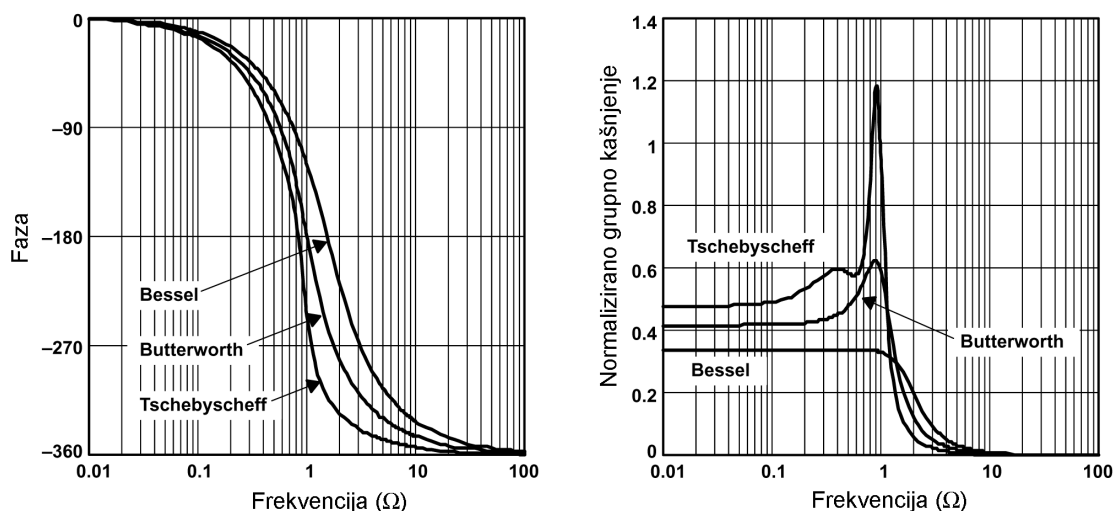
**Tschebyscheff filtri** su filtri optimizirani za što brži prijelaz iz područja propuštanja u područje gušenja. Oni za jednaki red filtra omogućuju brži pad prijenosne karakteristike, što znači da ona brže opada nakon granične frekvencije. To se ne može postići uz neke

nedostatke. Kod ovih filtara se oko granične frekvencije pojavljuje istitravanje prijenosne karakteristike. Što je pad filtra veći to će istitravanje biti izraženije. Filtri parnog reda imaju istitravanje iznad, a nepranog ispod 0 dB. Često se rabe u uređajima koji koriste filtarske nizove, gdje je frekvencijski pojas važniji od amplitude. Slika 3.28 prikazuje prijenosne karakteristike ovog filtra.



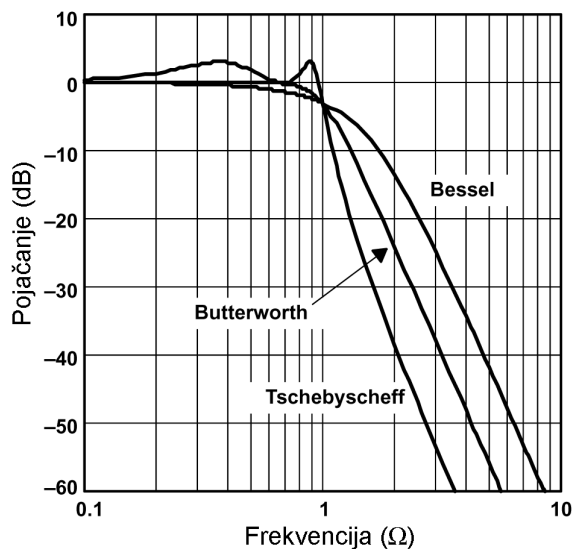
Slika 3.28 Tschebyscheff filtar.

**Bessel filtri** su filtri optimizirani za linearnu faznu prijenosnu karakteristiku preko širokog frekvencijskog područja, što rezultira u konstantnom grupnom kašnjenju. Zbog toga Bessel filtri omogućuju optimalnu prijenosnu karakteristiku za dinamičke signale, na primjer za pravokutni signal. S druge strane pojačanje propusnog dijela pada puno prije granične frekvencije, a prijelaz iz područja propuštanja u područje gušenja nije oštar. Slika 3.29 prikazuje prijenosne karakteristike Bessel filtra.



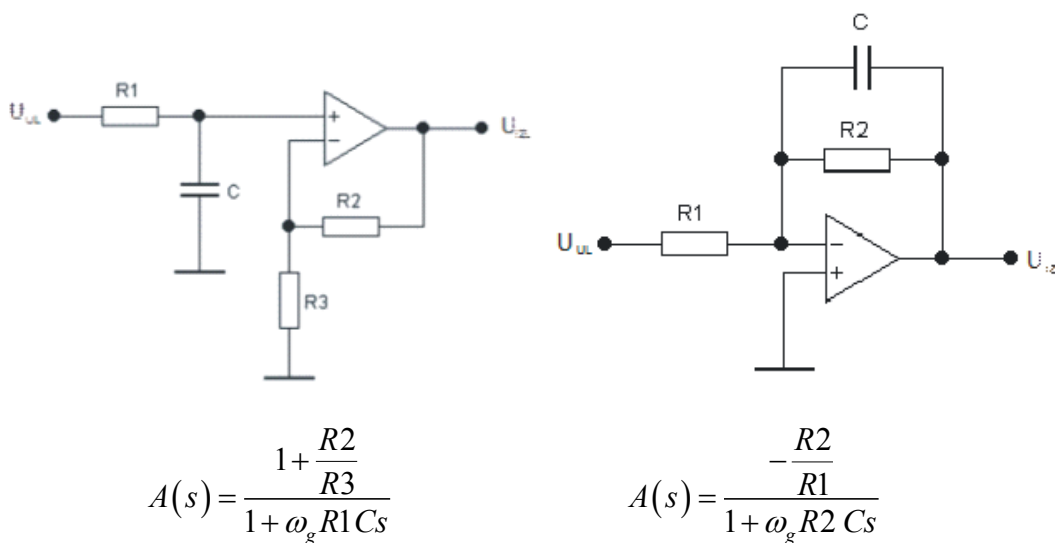
Slika 3.29 Prijenosne karakteristike Bessel filtra.

Na slici 3.30 prikazana je usporedba prijenosnih frekvencijskih karakteristika sve tri osnovne vrste filtera.

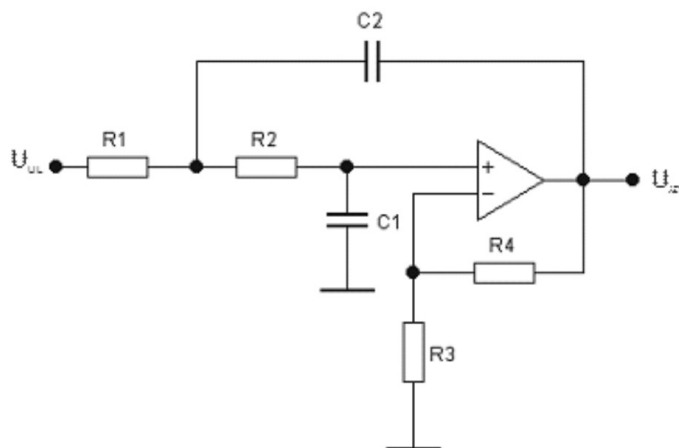


Slika 3.30 Usporedba tri osnovne vrste filtera.

Na sljedećim slikama su dane neke osnovne sheme filtera uz izraze za njihove prijenosne funkcije.

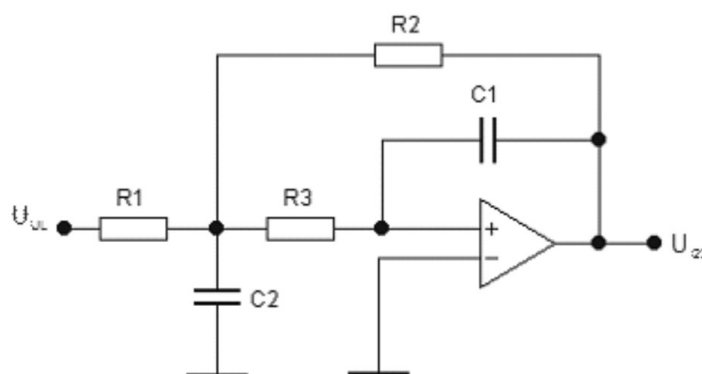


Slika 3.31 Nisko-propusni filtri prvog reda



$$A(s) = \frac{1}{1 + \omega_g C1(R1 + R2)s + \omega_g^2 R1R2C1C2s^2}$$

**Slika 3.32** Sallen-Key izvedba nisko-propusnog filtra drugog reda

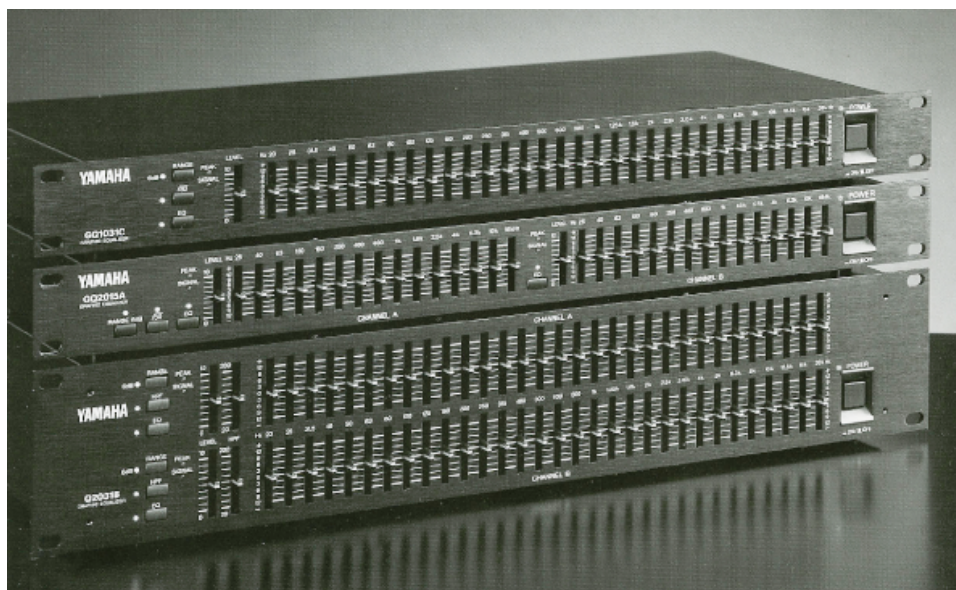


$$A(s) = - \frac{\frac{R2}{R1}}{1 + \omega_g C1 \left( R2 + R3 + \frac{R2R3}{R1} \right) s + \omega_g^2 C1C2R2R3s^2}$$

**Slika 3.33** MFB (Multiple Feedback) izvedba nisko-propusnog filtra drugog reda.

### Ekvalizatori

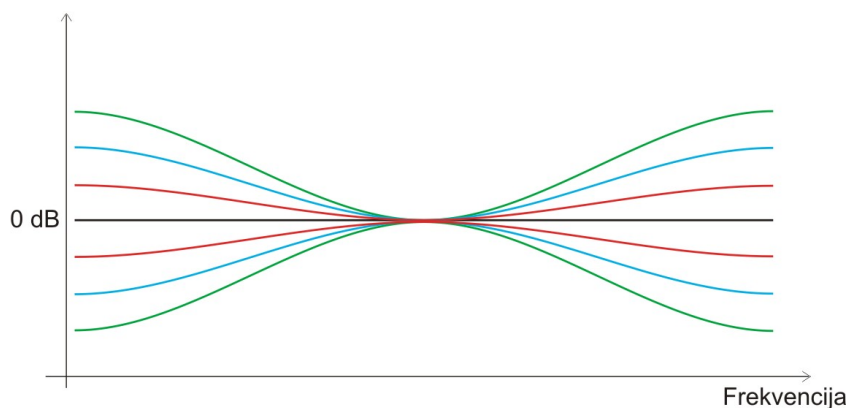
U audiotehnici se za namještanje frekvencija audio signale rabe ekvalizatori (*equalizer*) u raznim izvedbama. Ekvalizatori predstavljaju skup filtara u nizu koji pokrivaju cijelo ili dio frekvencijskog područja. Slika 3.34 prikazuje profesionalnu izvedbu jednog ekvalizatora.



Slika 3.34 profesionalni ekvalizator.

### Regulator boje tona

Najjednostavniji ekvalizator je regulator boje tona, koji se može naći u komercijalnim uređajima. Regulator boje tona omogućuje namještanje frekvencijske karakteristike uređaja samo na niskim i visokim frekvencijama. Naprednije izvedbe daju mogućnost regulacije razine srednjih frekvencija. Na slici 3.35 prikazane su prijenosne frekvencijske karakteristike regulatora boje tona.

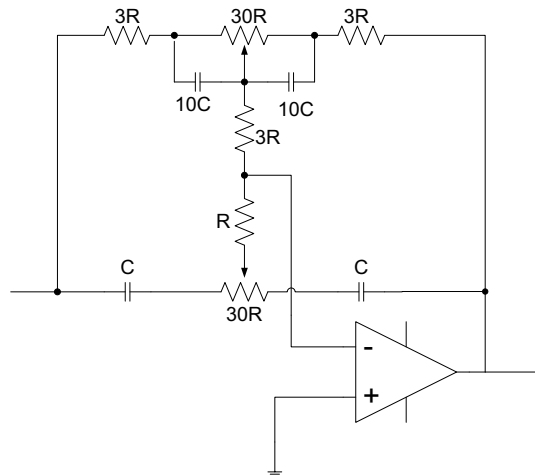


Slika 3.35 Prijenosna karakteristika regulatora boje tona s mogućnosti namještanja niskih i visokih frekvencija.

Shema regulatora boje tona je dana na slici 3.36. Okretanjem potenciometra regulira se pojačanje za određeno frekvencijsko područje. Analiza ovog sklopa se vrši za tri frekvencijska područja. Na niskim frekvencijama kondenzatori predstavljaju veliki otpor i slabo provode struju. U tom slučaju ostane samo gornji potenciometar s dva otpornika. Na srednjim frekvencijama kondenzatori 10C predstavljaju kratki spoj, a kondenzatori C još uvijek predstavljaju veliki otpor, tako da se izbacuju oba potenciometra i ostaju samo dva otpornika 3R. U tom slučaju je pojačanje 1. Na visokim frekvencijama svi kondenzatori predstavljaju kratki spoj i ostaje donji potenciometar i otpornici koji čine spojnu trokut.



Kada se spoj trokut prebaci u spoj zvijezda dobije se isti spoj kao u slučaju niskih frekvencija.

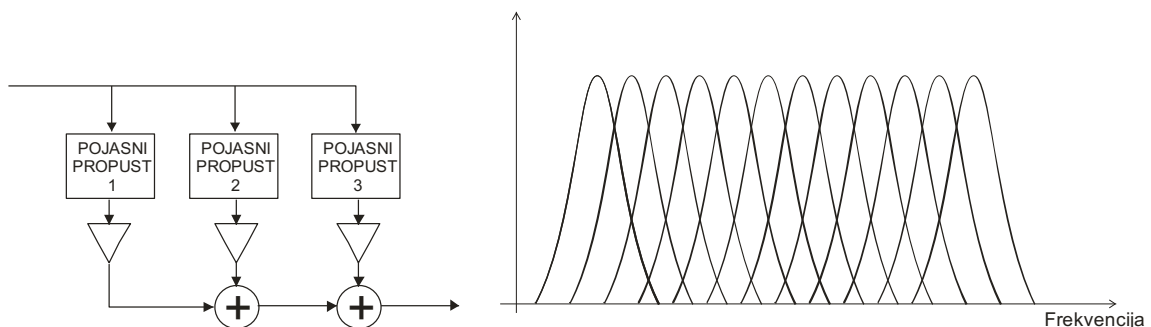


**Slika 3.36** Shema regulatora boje tona.

### Grafički ekvalizator

Grafički ekvalizator predstavlja korak naprijed od regulatora boje tona. On se sastoji od niza filtara sa fiksnim frekvencijama, kojima se može namještati samo pojačanje (gušenje) određenog filtra. Kada se namjesti određena frekvencijska karakteristika, položaj potencijometara odgovara grafičkom prikazu frekvencijske karakteristike, pa je od tuda dobio i ime.

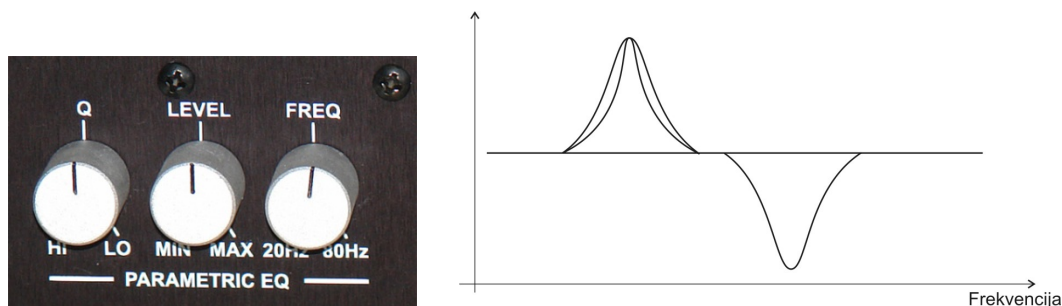
Izvedba ovog filtra je paralelna, što znači da su filtri u njemu spojeni u paralelan spoj prikazan na slici 3.37. U tom slučaju nema problema s promjenom faze signala, jer svaki filter ima jednaki pomak u fazi. Raspored frekvencija je logaritamski, a frekvencije su podijeljene na oktave, trećine oktava ili šestine oktava.



**Slika 3.37** Shematski prikaz grafičkog ekvalizatora s prijenosnim karakteristikama.

### Parametarski ekvalizator

Parametarski ekvalizator je filter koji pruža najviše fleksibilnosti jer omogućuje namještanje svih osnovnih parametara filtra, pa je prema tome dobio i naziv. Takav filter omogućuje namještanje središnje frekvencije, pojačanja (gušenja) na toj frekvenciji i širinu pojasa (Q faktor) propuštanja. Na slici 3.38 prikazana je jedna izvedba takvog filtra uz primjer prijenosne karakteristike.



Slika 3.38 Parametarski ekvalizator i prijenosna karakteristika.

### 3.3 Dinamička obrada signala

Dinamika je jedan od najvažnijih parametara u audiotehnici. Ona nam govori koliki nam je raspon od najtišeg do najglasnijeg signala uz uvjet malih izobličenja. Najtiši signali su ograničeni sa razinom šuma, odnosno na koncertima je poželjno da najtiše odsvirane ili otpjevane dionice budu glasnije od okolne buke i šuma. U uvjetima kada nema okolne buke ili šuma, najtiši signali su ograničeni pragom čujnosti ljudskog uha. Međutim, u realnim uvjetima ozvučavanja ili snimanja u studio rijetko se kada nađu uvjeti bez buke ili okolnog šuma.

S druge strane najglasniji signali su ograničeni pragom bola ljudskog uha ili električkim ograničenjima opreme koja se rabi za ozvučavanje. Na koncertima je bitno da reprodukcija ne bude preglasna, jer to može stvoriti neugodu kod slušatelja, ali opet dovoljno glasno da koncert bude kvalitetno reproduciran. Pojačala i zvučnici imaju svoja ograničenja što se tiče izlazne snage. Prevelike razine signala prvo dovode do porasta izobličenja, a s druge strane mogu dovesti do uništenja opreme.

Električka ograničenja ima i sva ostala oprema koja služi za pojačavanje i obradu "malih" signala. Svako pretpojačalo, filter, ulazni transformator ima svoju dinamiku, dakle odnos između najmanjeg i najvećeg signala koji može reproducirati ili prenijeti.

Prilikom reprodukcije signal se održava na nekoj nominalnoj razini, od koje može biti viši ili manji. Ako naglo poraste moramo ga na vrijeme spriječiti da ne poraste previše. Ako naglo padne, moramo ga podići iznad razine šuma.

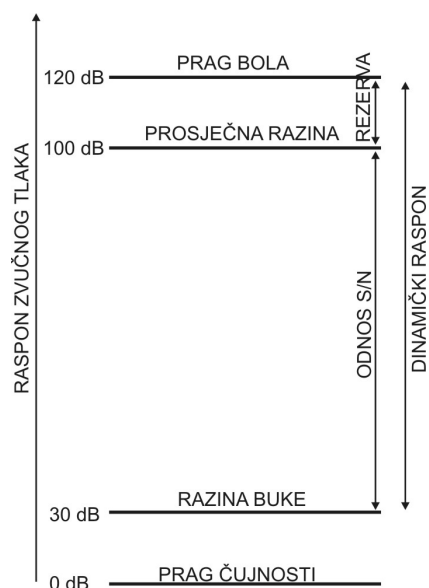
To su sve ograničenja na koja treba obratiti pažnju prilikom reprodukcije i snimanja, te je zbog toga važno znati i moći regulirati dinamičko ponašanje signala.

Na slici 3.39 prikazan je primjer dinamike jednog koncerta. U slučaju koncerta donja razina je ograničena razinom buke koja se obično kreće oko 30 dB, ali u nekim slučajevima kada publika pjeva zajedno s bendom može se povećati na 50-60 dB. Nominalna razina koncerta je oko 100 dB zvučnog tlaka, što ostavlja dovoljno rezerve (*headroom*) u slučaju naglog povećanja glasnoće, a održava glasnoću na prihvatljivoj razini, odnosno dovoljno glasno iznad okolne buke.

Regulacija dinamike se često koristi i u radijskim studijima. Na primjer ako se u studiju nalazi sugovornik, koji je pretih, njegov glas se mora pojačati. Kako ton-majstor to ne bi rado ručno, jer on ne može predvidjeti kada će gost početi glasno govoriti ili pak tiho govoriti, onda ulogu regulacije dinamike preuzimaju uređaji koji to rade automatski.

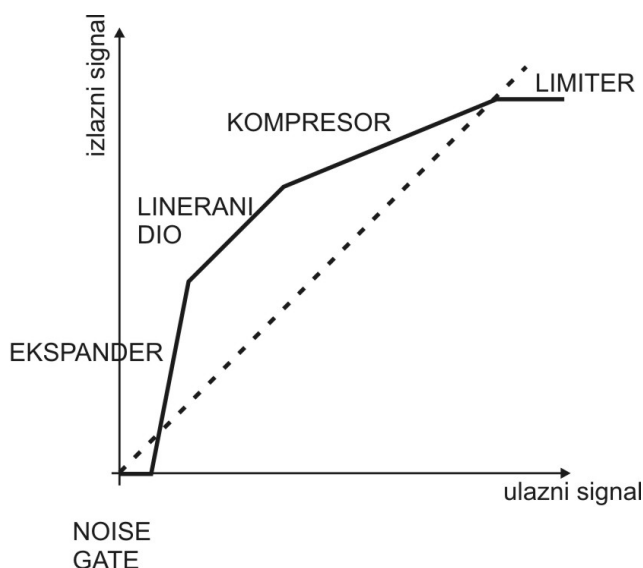
Još jedan primjer regulacije dinamike na radijskoj postaji je situacija kada voditelj govori u eter preko glazbene podloge. Kada govori glazba se mora utišati, a kada prestane

govoriti ona se treba pojačati. Ako imamo uređaj koji reagira na glasnoću glasa vođitelja, onda ga može iskoristiti da regulira glasnoću glazbene podloge.



**Slika 3.39** Primjer dinamike na koncertu.

Za regulaciju dinamike koriste se četiri osnovna uređaja: limiter, noise gate, kompresor i ekspander. Na slici 3.40 prikazana je karakteristika pojačanja uređaja koji ima karakteristike sva četiri spomenuta uređaja. Princip rada svih uređaja je u tome da reguliraju pojačanje ulaznog signala na osnovi njegove razine.

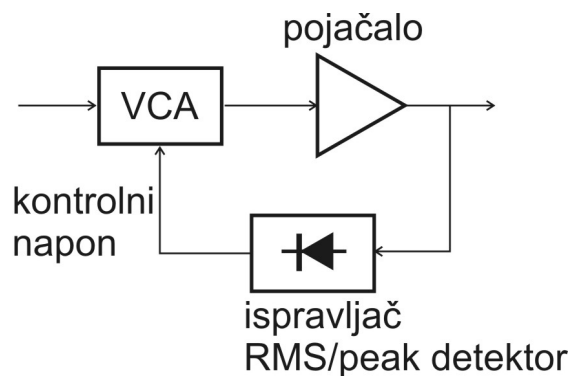


**Slika 3.40** Karakteristike pojačanja noise gate-a, ekspandera, kompresora i limitera.

### *Limiter*

Limiter je najjednostavniji uređaj za regulaciju dinamike signala. Njegov zadatak je da ograniči maksimalnu amplitudu signala. Na primjer, na koncertima se koristi za ograničavanje razine signala koja se šalje u pojačala snage, odnosno na zvučnike, jer

pojačala i zvučnici imaju svoje gornje granice što se tiče izlazne snage i električkog signala. Limiter se ne smije shvatiti kao uređaj koji reže signal, nego uređaj koji ograničava daljnji rast razine signala. Limiter radi na principu detekcije razine izlaznog signala. Shema limitera je prikazana na slici 3.41. Glavni dio svakog uređaja za regulaciju dinamike je VCA (Voltage Controlled Amplifier), odnosno pojačalo čije se pojačanje regulira vanjskim signalom. Signal sa izlaza pojačala se dovodi do ispravljača koji detektira njegovu efektivnu ili vršnu vrijednost, ovisno o izvedu (RMS/peak detector). Izlaz iz ispravljača je signal s kojim se upravlja s VCA sklopom.



**Slika 3.41** Shema rada limitera.

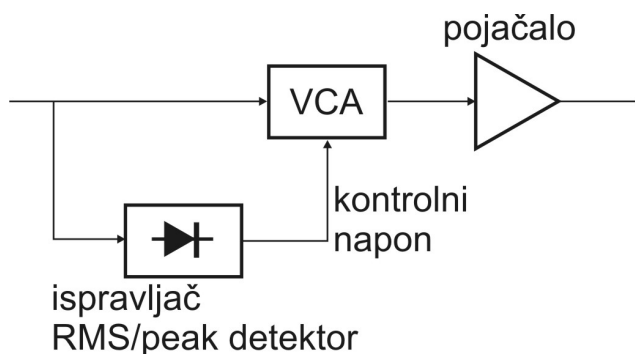
Karakteristika pojačanja limitera je prikazana na slici 3.42. Kada razina ulaznog signala u sklop poraste iznad neke granične razine (*threshold*) razina izlaznog signala više neće rasti s porastom ulaznog signala, nego će biti konstantna. Dakle iznad granične razine, promjena ulaznog napona neće uzrokovati nikakvu promjenu izlaznog napona.



**Slika 3.42** Karakteristika pojačanja limitera.

### Noise gate

Noise gate je uređaj koji radi suprotnu regulaciju od regulacije limitera, odnosno ograničava razinu jako niskih signala, odnosno šuma. Ako razina signala padne ispod neke donje granice pojačanje tog signala se spušta na nulu, odnosno signal se do kraja utišava. Ovaj uređaj se najčešće koristi za uklanjanje šuma u pauzama sviranja, pjevanja ili govora. Shema uređaja je prikazana na slici 3.43. Uređaj nadgleda razinu ulaznog signala u sklop i kada njegova razina padne ispod namještene donje granice, pojačanje VCA sklopa se smanjuje na nulu, kao što je prikazano na slici 3.44 na karakteristici pojačanja noise gate uređaja.



Slika 3.43 Shema noise gate uređaja.



Slika 3.44 Karakteristika pojačanja noise gate uređaja.

### Kompresor

Kompresor radi na sličnom principu kao limiter samo ne ograničava razinu signala, nego smanjuje pojačanje signala u ovisnosti o njegovoj razini. Dakle ako signal poraste iznad neke granice, kompresor neće naglo ograničiti njegovu razinu, nego će to raditi postepeno u jednom ili više koraka, ovisno o tome koliko stupnjeva kompresije koristimo. Shema rada kompresora je jednaka shemi noise gate uređaja. Uređaj detektira efektivnu ili vršnu vrijednost ulaznog signala, te s tim kontrolnim naponom regulira pojačanje VCA sklopa, a time i pojačanje tog istog ulaznog signala. Primjer karakteristike kompresora je dan na slici 3.45. Kompresija se može namjestiti u nekoliko razina, uz dvije ili više

graničnih razina. Ispod prve granične razine pojačanje VCA sklopa će biti 1:1, dakle za promjenu ulaznog signala za 1 dB, to će uzrokovati promjenu izlaznog signala za 1 dB. Iznad prve granične razine, promjena ulaznog signala od 2 dB će uzrokovati promjenu izlaznog signala za 1 dB. Iznad druge granične razine, promjena ulaznog signala od 4 dB će uzrokovati promjenu izlaznog signala od 1 dB. Na taj način se razina izlaznog signala polako smanjuje s porastom ulaznog signala u odnosu na linearnu prijenosnu karakteristiku (1:1).



**Slika 3.45** Karakteristika pojačanja kompresora.

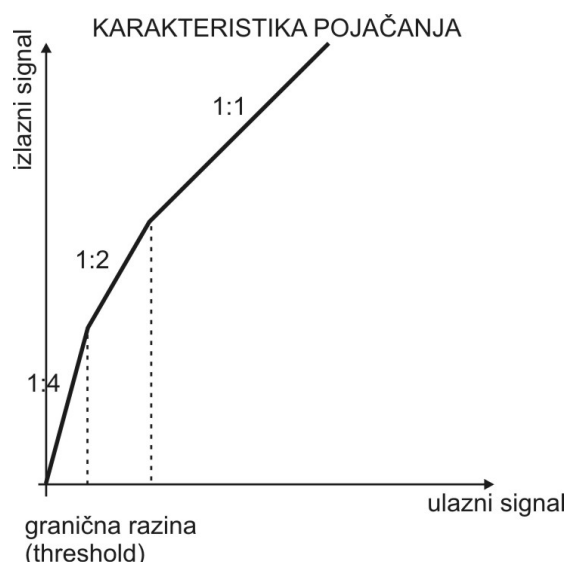
Osim za ograničavanje razine signala, kompresori se često koriste i za poboljšanje kvalitete reprodukcije. Pravilnim odabirom graničnih razina i razina kompresije može se dosta utjecati na kvalitetu sviranja.

### *Ekspander*

Suprotno od kompresora je ekspander, odnosno uređaj koji regulira pojačanje signala ispod neke granične vrijednosti. Ekspander se koristi za proširenje, odnosno "ekspandiranje" dinamike signala. U tom slučaju ekspander smanjuje pojačanje signala ispod neke razine. Na taj način se povećava raspon između najviših i najnižih razina signala, odnosno povećava se dinamika signala.

Shema ekspander je jednaka shemi kompresora i noise gate uređaja. Sustav nadzire razinu ulaznog signala, te kada ona padne ispod neke donje granice regulira pojačanje VCA sklopa, koji ona regulira pojačanje ulaznog signala, odnosno razinu izlaznog signala.

Karakteristika pojačanja ekspandera u oba slučaja dane su na slici 3.46.

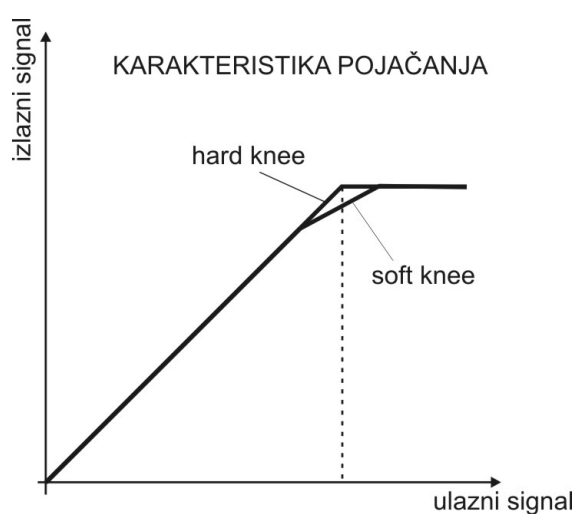


Slika 3.46 Karakteristika pojačanja ekspandera.

### Regulacija

Način na koji limiter, noise gate, kompresor i ekspander reagiraju na ulazni signal je dosta bitan, jer to utječe na kvalitetu reprodukcije. Zbog toga se kod ovih uređaja, osim graničnog napona i razine pojačanja, mogu regulirati još neki parametri koji upravo određuju način prijelaza iz jednog područja pojačanja u drugo te brzinu reakcije na promjenu ulaznog signala.

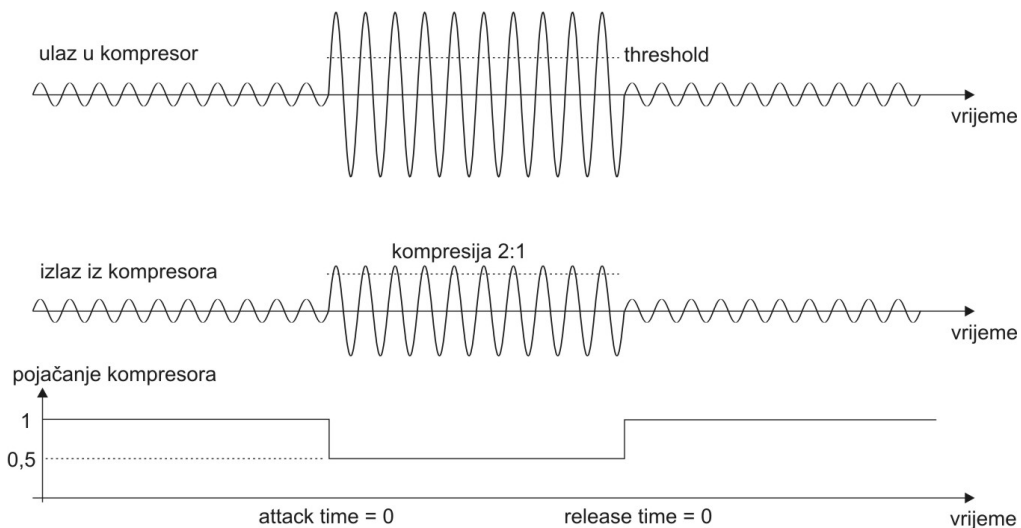
Prvi parametar je način prijelaza iz jednog područja pojačanja u drugo. Taj prijelaz može biti oštar, ali može biti i blag. Prema tome se ti prijelazi nazivaju *hard knee* i *soft knee*, što u doslovnom prijevodu znači tvrdo koljeno i mekano koljeno. Razlika između ova dva parametra je prikazana na slici 3.47. Ako je prijelaz iz jednog područja u drugo nagli (*hard knee*) publika će to čuti kao neugodan signal, a ako je taj prijelaz blag (*soft knee*), publika taj prijelaz možda neće niti zamijetiti. S druge strane, ako je taj prijelaz prespor, možda limiter neće moći izvršiti svoju funkciju.



Slika 3.47 Razlika između tvrdog i mekog prijelaza.

Kod noise gate uređaja, kompresora i ekspandera u igri je drugi parametar, a to je brzina reakcije na promjenu ulaznog signala. Na početku reakcije ovih uređaja to vrijeme se naziva vrijeme reakcije – *attack time*, a na kraju prestanka djelovanja uređaja, vrijeme otpuštanja – *release time*. Kao i kod limitera nije svejedno kakvo će biti vrijeme reakcije odnosno vrijeme otpuštanja, jer to dosta utječe na kvalitetu reprodukcije. Uz pametnu uporabu ova dva parametra, kvaliteta reprodukcije se može značajno povećati.

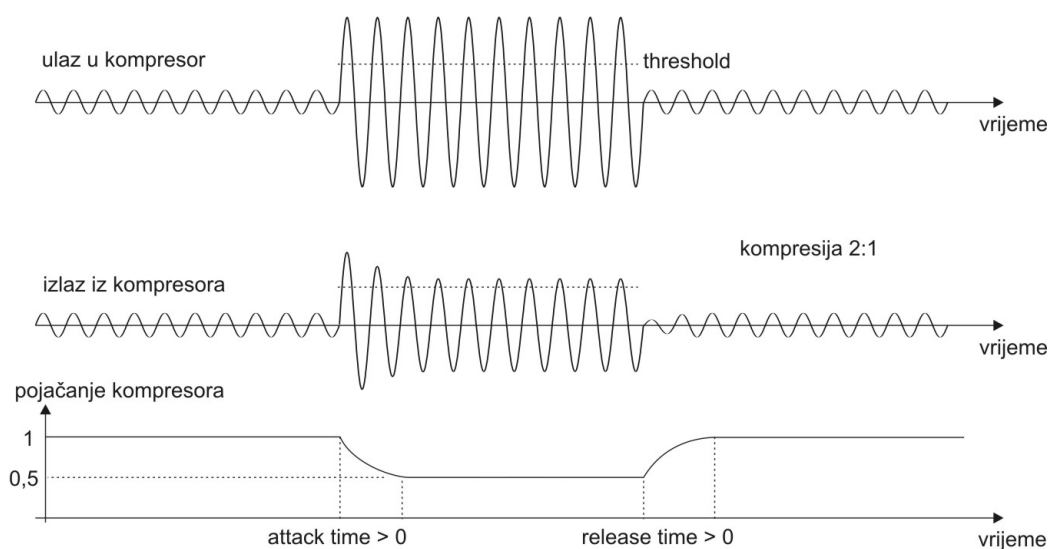
Na slici 3.48 dan je primjer rada kompresora za slučaj kada su oba ova vremena jednaka nuli. U tom slučaju su vrijeme reakcije i vrijeme otpuštanja trenutni. Prijelaz iz jednog pojačanja u drugo je jako brz. Kada je razina ulaznog signala ispod granične razine, pojačanje sklopa je 1. Kada ulazni signal prijeđe graničnu razinu (*threshold*), kompresor reagira i pojačanje sklopa smanjuje na 0,5, tako da je i razina izlaznog signala manje od razine kada bi pojačanje bilo 1. Na primjer u početku je razina ulaznog signala 0,1 V, a granična razina je postavljena na 0,2 V. U tom slučaju je pojačanje 1 i izlazni signal će biti također 0,1 V. Kada razina ulaznog signala poraste na 0,4 V, prešao je graničnu razinu i pojačanje pada na 0,5, tako da će razina izlaznog signala sada biti 0,2 V. Kada razina ulaznog signala opet padne ispod granične razine od 0,2 V, pojačanje se vraća na 1.



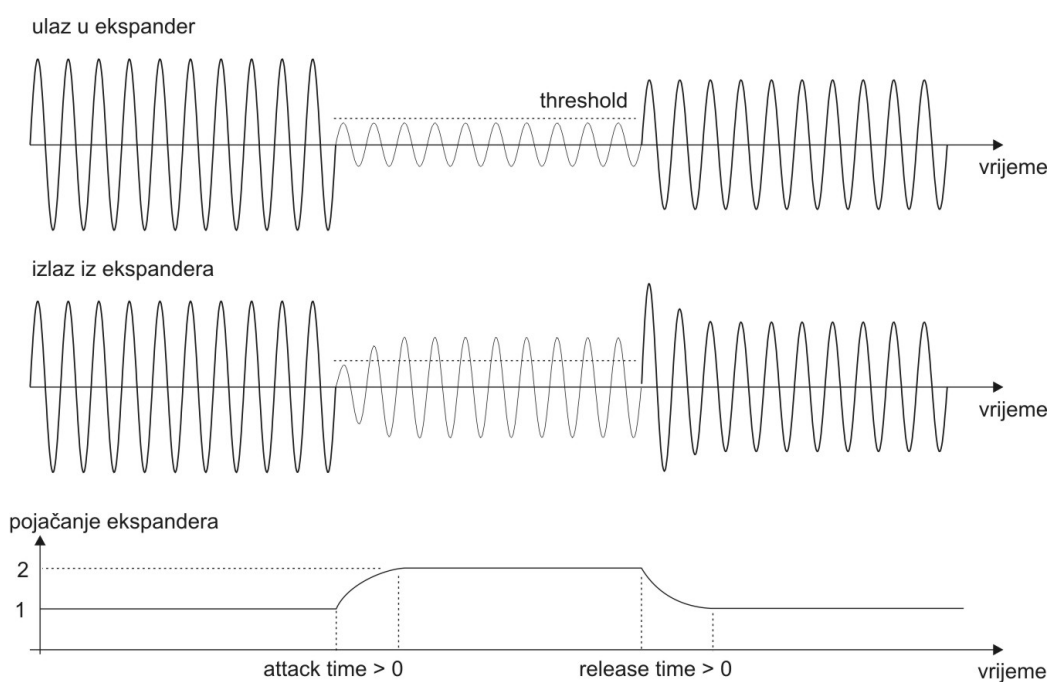
**Slika 3.48** Rad kompresora kada su attack i release time = 0.

Na slici 3.49 dan je primjer rada kompresora kada su attack i release time veći od nula. U tom slučaju reakcija nije trenutna, nego postoji neko prijelazno vrijeme promjene s jednog pojačanja na drugo. Dakle, prijelaz s pojačanja 1 na pojačanje 0,5 je blago, kao i povratak na pojačanje sklopa 1. To utječe i na oblik izlaznog signala u okolini točaka prijelaza. Tako će izlazni signal, zbog blage promjene pojačanja, u početku biti viši nego što je u trenutku kada se pojačanje stabilizira na vrijednosti 0,5. S druge strane, u trenutku prestanka djelovanja kompresora, izlazni signal će neko vrijeme biti niži nego kada se pojačanje stabilizira na vrijednosti 1.





**Slika 3.49** Rad kompresora kada su attack i release time veći od 0.

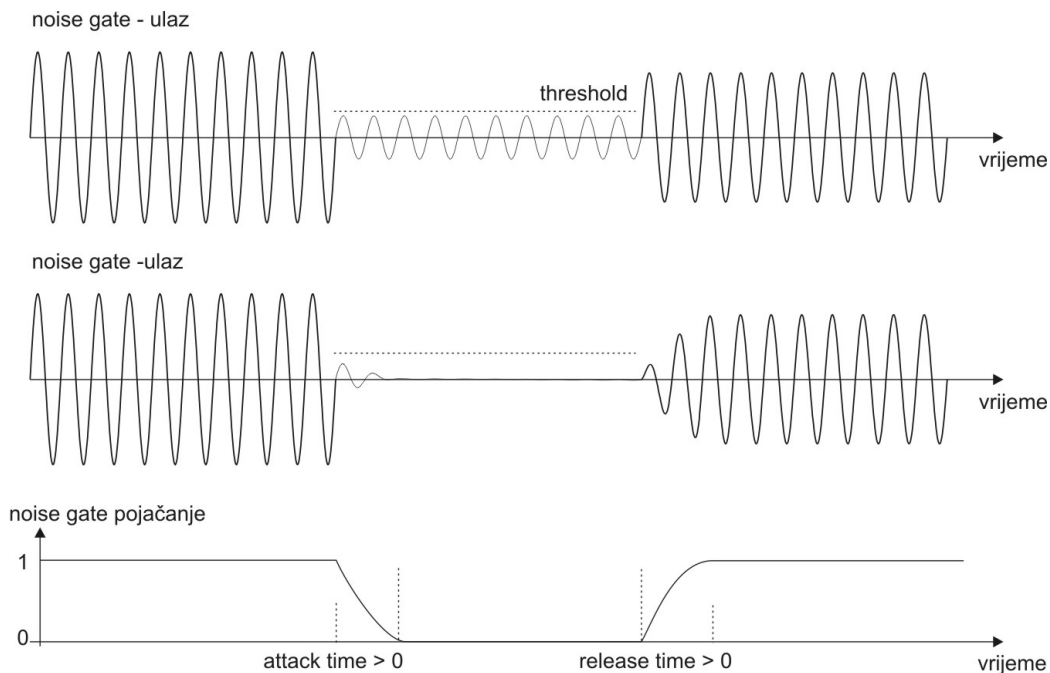


**Slika 3.50** Primjer rada ekspander kada su attack i release time  $> 0$ .

Jednaka analiza se može primijeniti na ekspander, noise gate i limiter. Na slici 3.50 prikazan je primjer rada ekspander, kada radi kao sklop koji pojačava tihe signale, odnosno signale koji padnu ispod neke granične razine (*threshold*). Ako je ulazni signal 0,4 V, pojačanje ekspandera je 1 i izlazni signal je također 0,4 V. recimo da je granični napon postavljen na 0,2 V. Ako ulazni signal padne na razinu 0,15 V, tada je ispod graničnog napona i pojačanje sklopa se mijenja na 2, te će razina izlaznog napona u tom slučaju porasti na 0,3 V. Kada ulazni napon ponovo poraste iznad 0,2 V, pojačanje sklopa se vraća na razinu 1.

Slika 3.51 prikazuje primjer rada noise gate uređaja kada su attack i release time veći od nula. Na primjer, neka je granična razina postavljena na 0,1 V. Kada je ulazni signal 0,2 V, pojačanje sklopa je 1, te je razina izlaznog signala također 0,2 V. Kada ulazni signal

padne na 0,08 V, pojačanje sklopa je 0, pa će razina izlaznog signala biti 0 V. Kada se razina ulaznog signala ponovo podigne iznad graničnog napona na 0,2 V, pojačanje će opet biti 1 i razina izlaznog signala će biti 0,2 V.

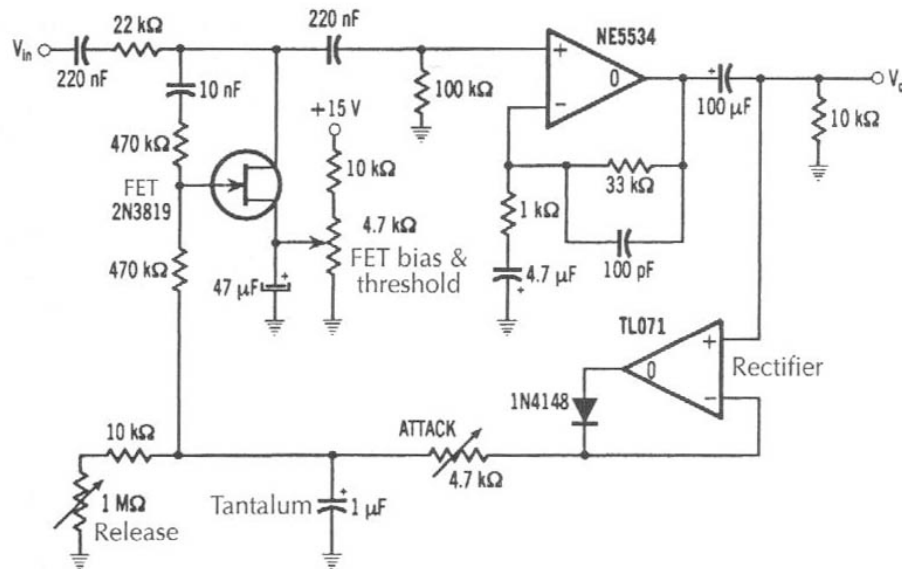


**Slika 3.51** Primjer rada noise gate uređaja kada su attack i release time  $> 0$ .

Kod namještanja attack i release vremena mora se biti jako oprezan, jer treba uzeti u obzir da će kod dužih vremena, pojačanje utjecati na signale koji će kasnije ući u sklop od signala na osnovi čije razine se regulira pojačanje. U nekim slučajevima je to korisno, jer se na taj način može utjecati na neke note koje su inače tiše ili glasnije, te se time može utjecati na kvalitetu reprodukcije.

Također treba biti opreza kod odabira razine kompresije. Prevelika kompresija utječe i an razinu šuma kod tihih dionica, odnosno pauza. Velike promjene uzrokuju takozvani "breathing" efekt. To se može riješiti povećanjem vremena otpuštanja, ali s druge strane preveliki vrijeme otpuštanja uzrokuje da će se niski signali u nekim trenucima izgubiti, što je takozvani "pumping" efekt.

Na slici 3.52 dana je jedna izvedba limitera, koja se sastoji od ispravljača signala (*rectifier*), koji detektira razinu signala, te FET-a koji služi kao VCA sklop. Attack i release vremena se mogu regulirati pomoću potencijometara iza ispravljača signala. Kada signal iz ispravljača poraste, poraste i regulacijski napon na ulazu FET-a, te struja kroz njegov izlazni dio poraste, te "krade" struju ulaznom signalu i na taj način ga smanjuje, a time se smanjuje i izlazni signal.



Slika 3.52 Shema limitera.

Većina profesionalnih uređaja ima mogućnost regulacije kompresije po određenim frekvencijskim područjima. Takva kompresija koja je ograničena na određene frekvencije signala se naziva multiband kompresija. Pomoću nje možemo namjestiti različitu razinu kompresije i ostale parametre za različita frekvencijska područja. To u praksi znači da svaki instrument ili glas mogu imati drugačiju razinu kompresije. To nam omogućava više fleksibilnosti u radu, a postiže se i veća kvaliteta zvuka.

Primjer multiband kompresije je takozvani "de-esser" uređaj. Poznato je da neki suglasnici koji u sebi imaju slova "s" i "t", imaju dosta veliki udio visokih frekvencija, koje su izraženije od ostalih. Taj zvuk je u nekim slučajevima dosta neugodan, pa ga na neki način treba smanjiti. U tom slučaju se koristi kompresija signala u frekvencijskom području 3-6 kHz.

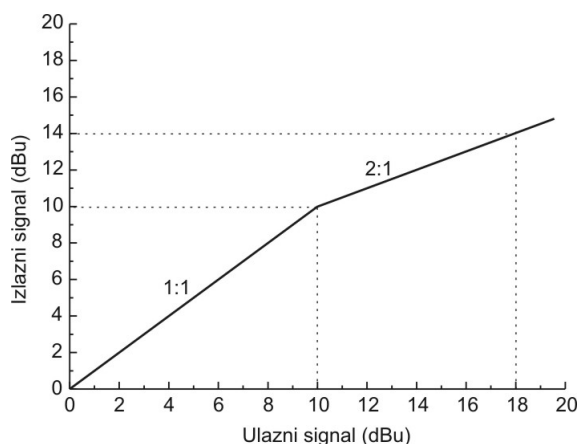
## Riješeni zadaci

### Zadatak 3.1

Treba nacrtati prijenosnu karakteristiku kompresora sa slijedećim parametrima: granična razina (threshold) je 10 dBu, a kompresija iznad te razine je 2:1. Ako se na ulaz kompresora dovede signal čija je razina 18 dBu, kolika će biti razina izlaznog napona?

Pretpostavka je da ispod granične razine ulaznog signala nema kompresije i da neće biti promjene pojačanja signala, odnosno odnos promjene će biti 1:1. Na slici je prikazana prijenosna karakteristika ovog kompresora.

Ako se na ulaz dovede signal od 18 dBu, u odnosu na graničnu vrijednost ulazni signal se promijenio za 8 dB. Odnos kompresije 2:1 označava odnos promjene ulaznog i izlaznog signala. U ovom slučaju, ako se ulazni signal promijeni za 2 dB, izlazni signal će se promijeniti za 1 dB. Dakle, ako se ulazni promijenio za 8 dB, onda će se izlazni promijeniti za dva puta manje, dakle 4 dB, iznad granične vrijednosti. Iz toga ispada da će izlazni signal biti 14 dBu.



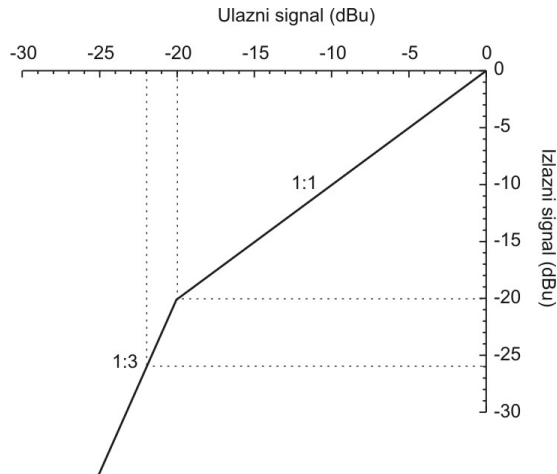
Prijenosna karakteristika kompresora iz zadatka

**Zadatak 3.2**

Treba nacrtati prijenosnu karakteristiku ekspandera sa slijedećim parametrima: granična razina je -20 dBu, a odnos ekspanzije ispod ove razine je 1:3. Ako se na ulaz ekspandera dovede signal razine -22 dBu, kolika će biti razina izlaznog signala?

Pretpostavka je da iznad granične razine ulaznog signala nema ekspanzije, odnosno odnos ekspanzije je 1:1. Na slici je prikazana prijenosna karakteristika ekspandera.

Ako se na ulaz ovog ekspandera dovede signal razine -22 dBu, ulazni signal će se prema graničnoj vrijednosti promijeniti ta 2 dB, što znači da će se izlazni signal prema graničnoj vrijednosti promijeniti za 6 dB. Prema tome razina izlaznog signala će biti -26 dBu.



## 4. Digitalni sustavi

Danas je digitalna tehnologija u audiotehnici nezaobilazni dio elektroakustičkog lanca. Digitalni sustavi imaju puno prednosti pred njihovim analognim ekvivalentima. Ali, imaju i neke nedostatke, prvenstveno što se tiče dinamike.

Analognim signalima se smatraju sve pojave u prirodi, pa tako i promjena zvučnog tlaka. Ono što je karakteristično za analogne signale, a po čemu se oni razlikuju od digitalnih je da se radi o kontinuiranim signalima. Broj amplituda koje analogni signal može postići je beskonačan. Isto vrijedi i za promjene u vremenu. Vremenski korak analognih signala je infinitezimalan. Na primjer, ako minimalna razina električnog signala 0 V, a maksimalna 10 V, onda analogni signal na primjer može poprimiti vrijednosti 1 mV, 1  $\mu$ V, 1 nV,...

Kod digitalnih sustava to nije moguće, nego je broj razina ograničen brojem bita za kvantiziranje analognog signala. Dakle, dinamika signala je ograničena.

S druge strane digitalni sustavi imaju puno prednosti nad analognim. Digitalni signal se sastoji od samo dvije električke razine, tako da je manje podložan smetnjama. U digitalne signale se često ubacuju kodovi za ispravljanje pogrešaka, pa ako i dođe do pojave greške, ona se može ispraviti. Može se reći da je margina za greške kod digitalnih signala relativno velika u usporedbi s analognim signalom.

Uz današnje procesore, mogućnosti obrade signala su daleko veće, a digitalna tehnologija nam omogućuje i nešto što nije moguće kod analognih signala, smanjenje protoka podataka, odnosno kompresiju.

### 4.1 A/D i D/A pretvorba

Kako bi se analogni signal mogao obrađivati i spremati u digitalnim sustavima, potrebno je provesti analogno-digitalnu pretvorbu signala. Slično, kada se signal želi vratiti u analognu domenu, potrebno je provesti digitalno-analognu pretvorbu.

Analogno-digitalna pretvorba se odvija u nekoliko koraka. Pretvorba se bazira na uzimanju uzoraka analognog signala u određenim vremenskim trenucima. Nakon toga se ti analogni uzorci pretvaraju u svoj digitalne ekvivalente, odnosno analognoj razini se dodjeljuje broj u digitalnom sustavu, niz "nula" i "jedinica".

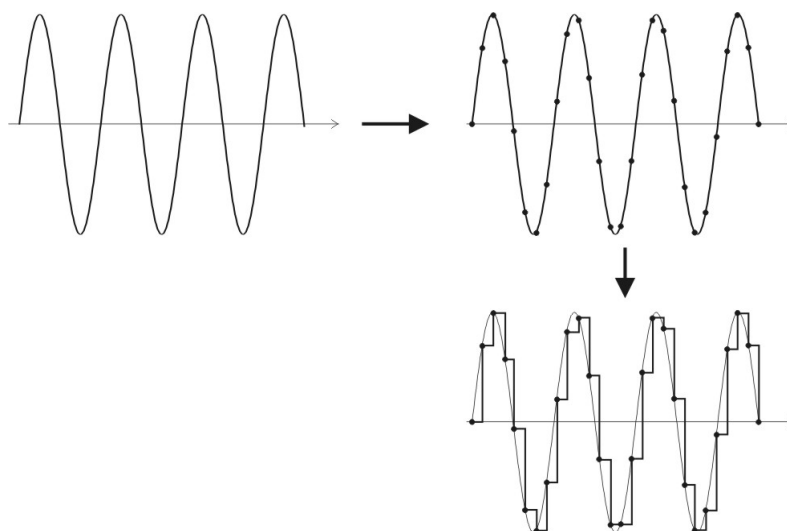
Kako je poznato digitalni sustavi imaju neka ograničenja, prvenstveno činjenica da vrijeme pretvorbe iz analognog u digitalni signal traje određeno vrijeme, tako da je vremenski razmak između uzimanja uzoraka ograničena mogućnostima A/D odnosno D/A pretvarača. S druge strane broj bita s kojima se memoriraju podaci je ograničen.

#### 4.1.1 Uzimanje uzoraka

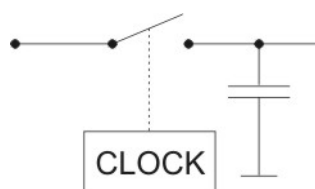
Kada govorimo o vremenskom koraku, odnosno vremenskoj rezoluciji, mislimo na frekvenciju uzorkovanja, odnosno učestalost uzimanja uzoraka u vremenu. Uzimanje uzoraka, znači očitavanje razine analognog signala u određenim vremenskim trenucima. Da bi se analogni signal pretvorio u digitalni potrebno je određeno vrijeme. Postavlja se pitanje kolika je minimalna frekvencija uzorkovanja dovoljna za kvalitetnu A/D pretvorbu?

Za uzimanje uzoraka analognog signala rabi se takozvani "sample and hold" sklop. Električka sklopka je upravljana s taktom frekvencije uzorkovanja. Kada se sklopka zatvori, analogni signal "napuni" kondenzator, koji ima zadatak zadržati tu vrijednost neko vrijeme, odnosno vrijeme pretvorbe u digitalni signal. Slika 4.1 prikazuje princip uzimanja uzoraka analognog signala, a slika 4.2 principijelnu shemu kruga za uzimanje uzoraka.

Kao što je vidljivo sa slike 4.1 uzorkovani signala na izlazu iz kruga za uzorkovanje ima "stepeničasti" oblik. Iz teorije signala i sustava proizlazi da postoji niz frekvencija koje jednoznačno mogu prikazati analogni signal kao niz uzoraka, odnosno diskretnih vrijednosti. Iz toga je proizašao Nyquistov teorem koji kaže da frekvencija uzorkovanja signala mora biti minimalno 2 puta veće od maksimalne frekvencije tog signala. Pod maksimalnom frekvencijom signala se smatra najviša moguća frekvencija koja se može pojaviti u tom signalu. Za audio signal to bi bila frekvencija od 20 kHz, jer to se smatra najvišom čujnom frekvencijom koje ljudsko uho može čuti.

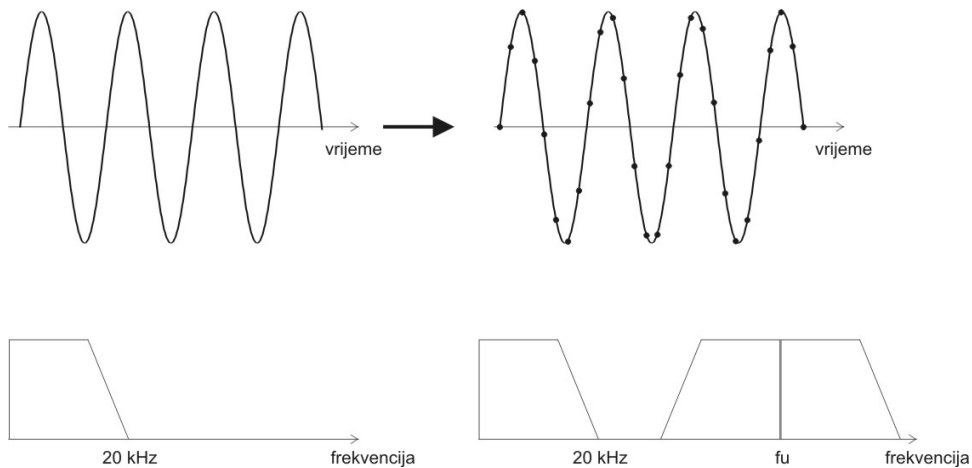


**Slika 4.1** Uzimanje uzoraka analognog signala.



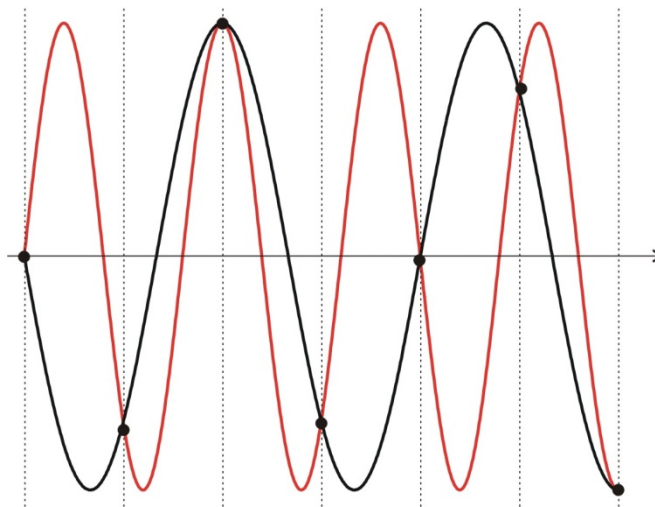
**Slika 4.2** Principijelna shema "sample and hold" kruga.

Na slici 4.3 prikazani su spektri analognog audio signala i uzorkovanog audio signala. Spektar analognog signala će se produžiti do 20 kHz. Ako takav signal uzorkujemo, onda će spektar novonastalog signala biti takav da se spektar samog analognog signala preslikava oko frekvencije uzorkovanja, dvostruke frekvencije uzorkovanja, i tako dalje.



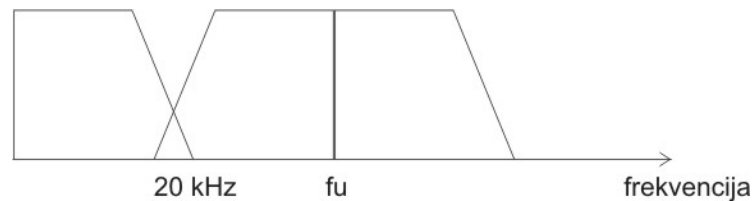
**Slika 4.3** Spektri analognog signala i uzorkovanog analognog signala.

Iz Nyquistove teorije proizlazi da minimalna frekvencija uzorkovanja audio signala mora biti 40 kHz, da ne bi došlo do problema. Ako je ta frekvencija uzorkovanja premala, onda se pojavljuju takozvana "aliasing" izobličenja, odnosno izobličenja preklapanja spektara. To dolazi od činjenice, da se s takvim uzorcima može prikazati više od jednog signala. Na slici 4.4 prikazana je jedan primjer ovog slučaja. Crne točke predstavljaju uzorke signala. Vidljivo je da se s tim uzorcima mogu prikazati dva signala različitih frekvencija. Ovaj efekt proizlazi iz karakteristika digitalnih signala.



**Slika 4.4** Primjer "aliasing" izobličenja.

Efekt "aliasing" izobličenja se još bolje vidi kada se signali prikazuju u frekvencijskoj domeni. Kada je frekvencija uzorkovanja manja od dvostruke maksimalne frekvencije (za audio signal je to ispod 40 kHz), dolazi do preklapanja spektara, tako da se u digitalnom signalu pojavljuju nove komponente. Na primjer ako se u analognom signalu nalazi frekvencija  $f=15$  kHz, a frekvencija uzorkovanja je 32 kHz, tada će se u digitaliziranom analognom signalu pojaviti komponenta  $f=32$  kHz-15 kHz=17 kHz, koja nije postojala u originalnom signalu. Na slici 4.5 prikazan je jedan takav slučaj.



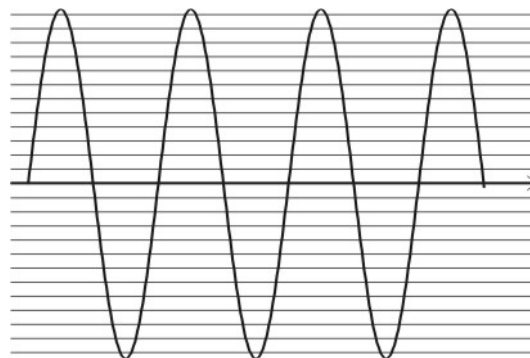
**Slika 4.5** "Aliasing" izobličenja; preklapanje spektara.

Kako bi se spriječila pojava "aliasing" izobličenja, na ulazu svakog A/D pretvarača se nalazi nisko-propusni filter, čija se gornja granična frekvencija određuje prema frekvenciji uzorkovanja. Dakle, ako je frekvencija uzorkovanja 32 kHz, tada će gornja granična frekvencija NF filtra biti  $32 \text{ kHz}/2=16 \text{ kHz}$ . U ovom slučaju se pretpostavlja idealni filter, koji ima brzi prijelaz iz područja propuštanja u područje gušenja. Kako je vrlo teško postići takav filter, onda frekvencija uzorkovanja podiže, ali gornja granična frekvencija NF filtra ostaje ista. Na taj način se kompenzira pad filtra iz područja propuštanja u područje gušenja, koji nije idealan.

Dakle ako povećavamo frekvenciju uzorkovanja, možemo koristiti manje kompliciran i jednostavniji filter, koji će unijeti manje izobličenja u sam signal. Zbog toga se u nekim A/D pretvaračima radi "oversampling" tako da se početna frekvencija uzorkovanja multiplicira. Kod sigma-delta A/D pretvarača frekvencija uzorkovanja se kreće oko nekoliko MHz. Na taj način se može koristiti filter manjeg reda, ali se i proširuje područje frekvencija audio signala, tako da se uzorkuju frekvencije audio signala koje nisu čujne, ali su bitne za rekonstrukciju brzih, tranzijentnih signala, koji imaju veliki udio visokih frekvencija.

#### 4.1.2 Kvantiziranje

Ako kažemo da je broj bita digitalnih sustava ograničen, to znači da će i broj analognih razina, kada se prebace u digitalni sustav također biti ograničen. Na primjer, ako imamo digitalni sustav koji podatke sprema samo s jednim bitom, takav sustav će moći spremiti samo dvije razine, na primjer 0V i 1V. Ako koristimo digitalni sustav koji podatke sprema s 8 bita, to mu omogućuje da spremi 256 razina analognog signala. Na primjer, ako je raspon analognog signala od 0V do 1V, razmak između pojedinih razina analognog signala će biti  $1/256 = 0,003906 \text{ V}$ . To znači da će moći spremiti razine 0V, 0,003906V, 0,007812V, ..., 0,996094 V, 1V. Slika 4.6 prikazuje primjer raspodjele razina analognog signala. U ovom primjeru analogni signal je podijeljen na 12 razina za pozitivne i 12 razina za negativne vrijednosti. To znači da će i digitalni oblik ovog analognog signala imati ukupno 24 razine.



**Slika 4.6** Raspodjela razina analognog signala.



S povećanjem broja bita smanjuje se i razmak između pojedinih razina, tako da će se moći spremati još manje promjene signala. Za sustave sa 16 bita, broj razina je 65.536, a za sustave sa 24 bita 16.777.216 razina.

Naravno postavlja se pitanje koliko je bita dovoljno? Odnosno koliko malu promjenu razine ljudsko uho zamjećuje. Ta mala promjena određuje dovoljan broj bita za kvantiziranje signala. Ispitivanja su pokazala da je za CD-audio format dovoljno 16 bita, jer 90% osoba ne čuje razliku između ovog i većeg broja bita.

Vidljivo je da u svakom slučaju, bez obzira na broj razina dolazi do malih neodređenosti kvantiziranja signala, koje se nazivaju "šum kvantizacije". Na primjer ako je jedna razina 1 V a druga 2 V, pitanje je kojoj razini će se pridijeliti vrijednost 1,4 V? Za ovaj primjer vrijednosti od 0,6 V do 1,5 V će se pridijeliti vrijednosti 1V, a vrijednosti od 1,6 V do 2,5 V će se pridijeliti vrijednosti od 2 V. Dakle postoji nesigurnost dodjeljivanja razina od 0,5 V.

Iz svega ovoga je vidljivo da su odnos signal-šum digitalnog signala, odnosno dinamika, određeni brojem bita koji se koriste za kvantizaciju. Najmanji korak nam određuje minimalnu razinu signala, odnosno šuma, a maksimalni broj razina, maksimalnu razinu signala. To se može sažeti u jedan izraz za dinamiku digitalnih sustava:

$$20 \cdot \log(2^n) = 6,0206 \cdot n \quad [\text{dB}]$$

Ako imamo sustav s 8 bita, dinamika će biti 48 dB. To je dovoljno za razumljivost govora, pa se kvantizacija od 8 bita koristi kod GSM komunikacija. Za CD-audio format, broj bita je 16, pa je teorijska dinamika 96 dB. Profesionalna audio oprema koristi 24 bitne pretvarače, pa je teorijska dinamika 144 dB. Naravno radi se o teorijskim vrijednostima, koje su ograničene i drugim problemima, kao što je moguća nelinearnost A/D i D/A pretvarača, te drugi izvori šumova, pa se realna dinamika smanjuje.

Frekvencija uzorkovanja i broj bita su direktno povezani s brzinom protoka podataka signala. Za CD-audio format brzina protoka podataka je

$$2 \text{ (kanala)} \times 16 \text{ (bita)} \times 44100 \text{ (1/sek)} \sim 1,4 \text{ Mbit/sek}$$

To znači da jedna minuta CD-audio formata zauzima oko 10 MB prostora.

Kod MP3 formata, brzina protoka je puno manja i kreće se od 32 kbit/sek do 320 kbit/sek. To je omogućeno kompresijom podataka, o kojoj će biti riječi nešto kasnije.

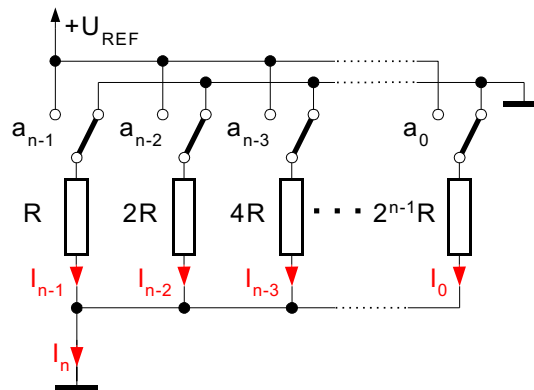
#### 4.1.3 D/A pretvarači

Objašnjenje A/D i D/A pretvorbe započinjemo s D/A pretvaračima, koji su sastavni dio A/D pretvarača, te se radi o jednostavnijim sklopovima.

D/A pretvarači pretvaraju digitalnu veličinu u analognu. Digitalna veličina je prikazana s nizom nula i jedinica, gdje pozicija nula i jedinica u binarnom zapisu određuje potenciju broja dva:

$$N = a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_12^1 + a_02^0$$

Kombinacijama nula i jedinica se postižu sve moguće razine, od 000000 do 111111, ako se radi o 6 bitnom zapisu. Analogni signal se može vrlo lako rekonstruirati ako se svakoj poziciji u binarnom zapisu pridijeli određena razina struje. Na tom principu rade D/A pretvarači s *težinski raspoređenim otporima*. Na slici 4.7 prikazana je jedna takva konfiguracija. Otpornici u ovoj mreži se odnose kao potencije broja dva:  $R, 2R, 4R, \dots$ . Razina struje kroz svaki otpornik će odgovarati težini pozicije u binarnom broju, a sklopke se upravljaju s vrijednosti 0 ili 1 na toj poziciji. Vidljivo je da će se maksimalna izlazna struja, koja je zbroj svih struja kroz otpornike, postići kada su sve sklopke zatvorene, odnosno kada se na svim pozicijama u binarnom broju nalaze jedinice.

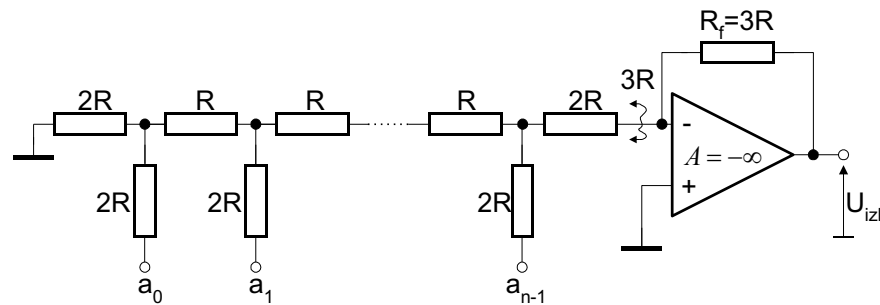


Slika 4.7 D/A pretvarač s težinski raspoređenim otporima

Izlazna struja će biti zbroj svih struja, a struje su određene referentnim naponom  $U_{REF}$ , otpornicima i vrijednostima koeficijenata  $a_i$ .

$$\begin{aligned} I_N &= U_{REF} \cdot \left( \frac{a_{n-1}}{R_{n-1}} + \frac{a_{n-2}}{R_{n-2}} + \dots + \frac{a_0}{R_0} \right) \\ &= \frac{U_{REF}}{2^{n-1} \cdot R} \cdot (a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + a_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_0 \cdot 2^0) \\ &= \frac{U_{REF}}{2^{n-1} \cdot R} \cdot N \end{aligned}$$

Nedostatak ovakve *težinski raspoređene mreže* je u tome da je potrebno napraviti otpornike s točno određenim odnosom od  $R$  do  $2^{n-1}R$ , što je dosta teško precizno napraviti. Zbog toga je izvedena druga konstrukcija, s takozvanom *ljestvičastom otpornom mrežom*. U ovom slučaju se koriste samo dvije razine otpora  $R$  i  $2R$ , što je puno jednostavnije napraviti prema danim tolerancijama. Na slici 4.8 dana je shema jedne takve mreže zaključene s operacijskim pojačalom.



**Slika 4.8** Ljestvičasta otporna mreža s operacijskim pojačalom

Doprinosi pojedinih *bitova* se određuju metodom superpozicije, a konačni izlazni signal prema shemi na slici 4.8 se može izračunati prema slijedećoj jednakosti.

$$U_{n-1} = \frac{1}{3} \cdot \frac{U_{REF}}{2^{n-1}} \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot 2^i = \frac{1}{3} \cdot \frac{U_{REF}}{2^{n-1}} \cdot N$$

$$U_{izl} = -U_{n-1} \cdot \frac{R_f}{2R} = -U_{n-1} \cdot \frac{3R}{2R} = -\frac{1}{3} \cdot \frac{3R}{2R} \cdot \frac{U_{REF}}{2^{n-1}} \cdot N = -\frac{U_{REF}}{2^n} \cdot N$$

Na izlazu iz D/A pretvarača se dobije prije spomenuti stepeničasti signal, u kojem se razine pojavljuju u ritmu frekvencije uzorkovanja. Kako bi se iz njega izvukao čisti analogni signal, takav signal treba filtrirati s nisko-propusnim filtrom. Također je bitno da kao i kod A/D pretvorbe, gornja granična frekvencija filtra bude duplo manja od frekvencije uzorkovanja digitalnog signala.

Iako još postoji više izvedbi D/A pretvarača, pretvarači s otpornim mrežama se najčešće koriste u audio tehnici. Osim njih se sve češće koriste i sigma-delta D/A pretvarači koji će biti objašnjeni zajedno s sigma-delta A/D pretvaračima.

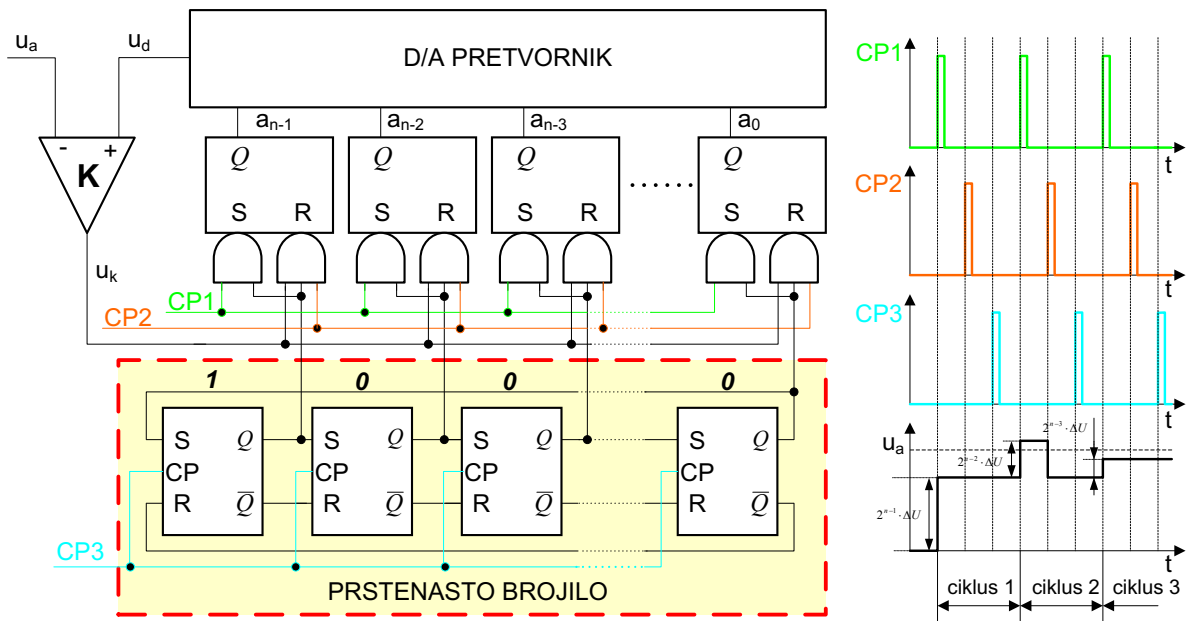
#### 4.1.4 A/D pretvarači

Iako postoje razne vrste A/D pretvarača u audio području se koriste A/D pretvarači sa sukcesivnom aproksimacijom, paralelni pretvarači te sigma-delta pretvarači. U prvom i trećem se u samom sklopu nalazi i D/A pretvarač. Kod svakog A/D pretvarača, koji pretvara analogni audio signala u digitalni audio signal, bitna je brzina pretvorbe, pogotovo ako se radi o višim frekvencijama uzorkovanja. Osim toga bitna je i linearnost pretvorbe, odnosno odnos između razina analognog signala i razina uzorkovanog signala.

##### *A/D pretvarač sa sukcesivnom aproksimacijom*

Ova vrsta pretvarača se ubraja u skupinu brzih A/D pretvarača, kod koje brzina pretvorbe točno traje koliko ima bitova za kvantiziranje. Pretvorba je direktna, jer se u petlji povratne veze nalazi D/A pretvarač. Princip rada se bazira na postepenom približavanu izlaza iz D/A pretvarača signalu na ulazu A/D pretvarača. To približavanje se odvija na poseban način, koji je prikazan na slici 4.9. U prvom koraku (ciklusu) izlaz iz D/A pretvarača je postavljen na polovici maksimalnog signala. Ako je signal manji od ulaznog analognog signala, izlaz iz D/A pretvarača se u drugom ciklusu povećava za četvrtinu maksimalne vrijednosti. Ako je sada signal veći od analognog signala, u slijedećem ciklusu se izlaz iz D/A pretvarača umanjuje za osminu maksimalnog signala i tako dalje. Kada završe svi ciklusi, čiji broj točno odgovara broju bita za kvantiziranje,

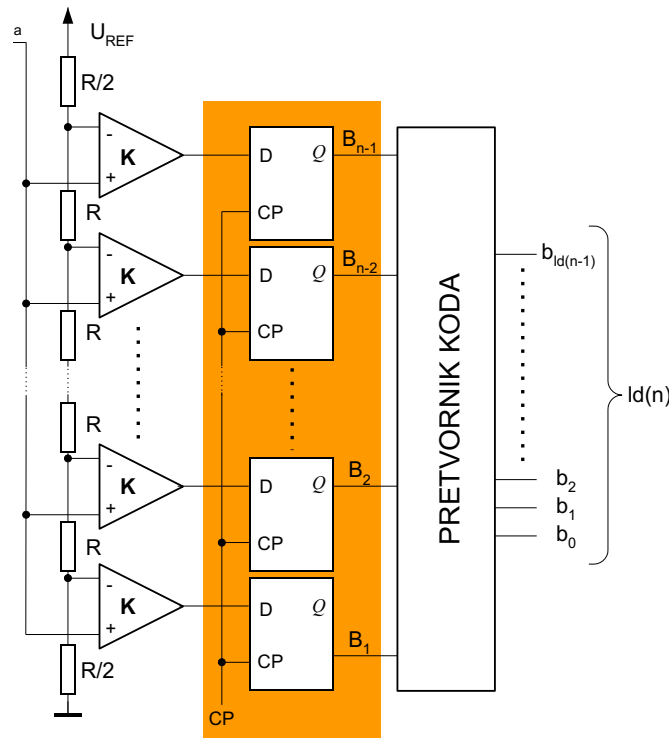
izlaz iz D/A pretvarača će se postepeno približiti analognom ulaznom signalu, te je ulaz u D/A pretvarač ujedno i izlaz iz A/D pretvarača.



**Slika 4.9** Princip rada A/D pretvarača sa sukcesivnom aproksimacijom.

#### Paralelni A/D pretvarač

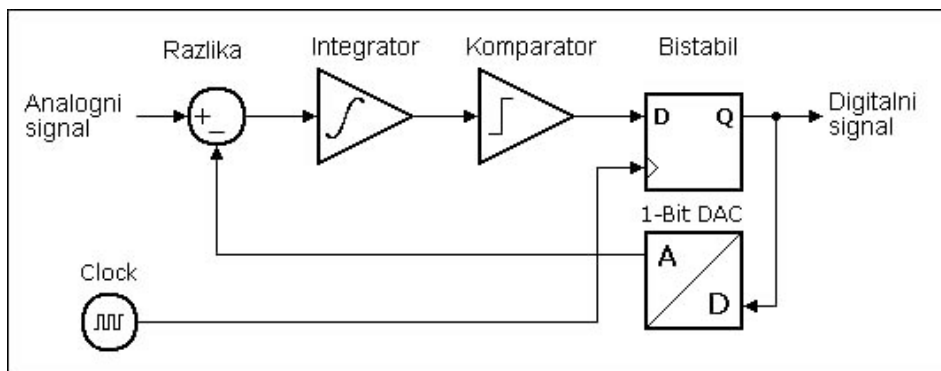
Ovo je jedna od najbržih izvedbi A/D pretvarača, a ujedno i najkompliciranija, te se koristi samo za posebne primjene, gdje je brzina pretvorbe od velike važnosti. Na slici 4.10 je prikazana shema rada paralelnog A/D pretvarača. Analogni signal se dovodi na niz komparatora, gdje se njegova razina uspoređuje s niz razina koje su dobivene od referentnog napona preko niza otpornika vrijednosti  $R/2$  i  $R$ . Ako je razina analognog signala veća od razine određenog komparatora, onda će se na izlazu tog komparatora pojaviti 1. U obrnutom slučaju će se pojaviti nula. To znači, kada se na ulazu pojavi maksimalni napon, na izlazima svih komparatora će se pojaviti jedinice. S druge strane kada je na ulazu razina 0, izlazi svih komparatora će biti nule. Ako se pojavi neka srednja razina, izlazi iz komparatora čije vrijednosti su manje od te razine analognog signala će biti 1, a svima ostalima će biti 0. To je takozvani "temperaturni" kod, koji se mora pretvoriti u standardni binarni kod. Zato se na izlazu ovog A/D pretvarača nalazi pretvornik koda.



Slika 4.10 Paralelni A/D pretvarač

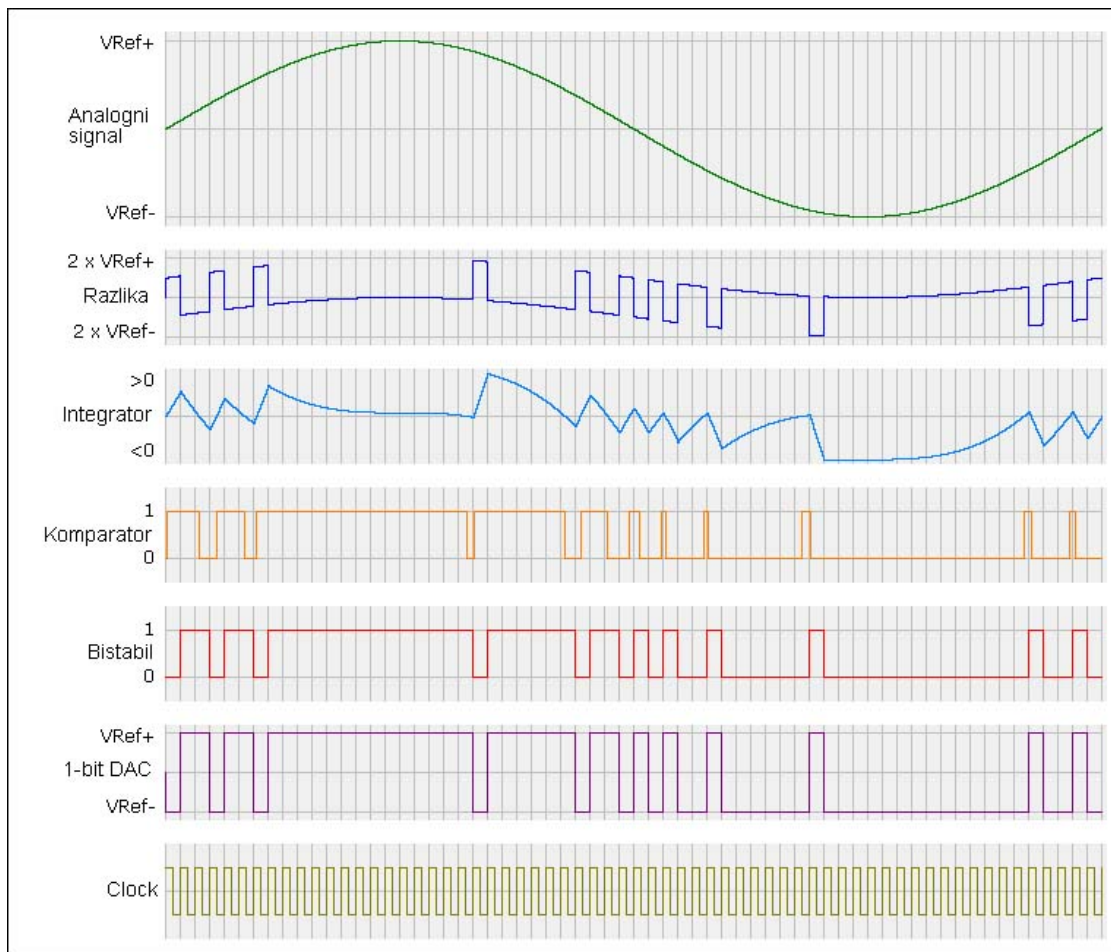
*Sigma-delta A/D pretvarač*

Rad ove vrste pretvarača se bazira na usporedbi ulaznog signala i signala D/A pretvarača u povratnoj vezi. Razlika prema drugim pretvaračima je u tome da se ne provjerava apsolutna razina signala, nego se kontrolira da li je analogni signal porastao, odnosno pao u odnosu na prethodnu razinu. Za to služi komparator. Ako je ulazni signal veći od rekonstruiranog signala iz D/A pretvarača generira se jedinica, a ako je manji generira se nula. Frekvencija takta ovakvog pretvarača je visoka i kreće se oko par MHz, kako bi se "uhvatile" sve male promjene signala. Nakon pretvorbe u niz nula i jedinica, slijedi digitalni filter koji signal prebacuje u standardni format s niskom frekvencijom uzorkovanja. Slika 4.11 prikazuje shemu sigma-delta A/D pretvarača.

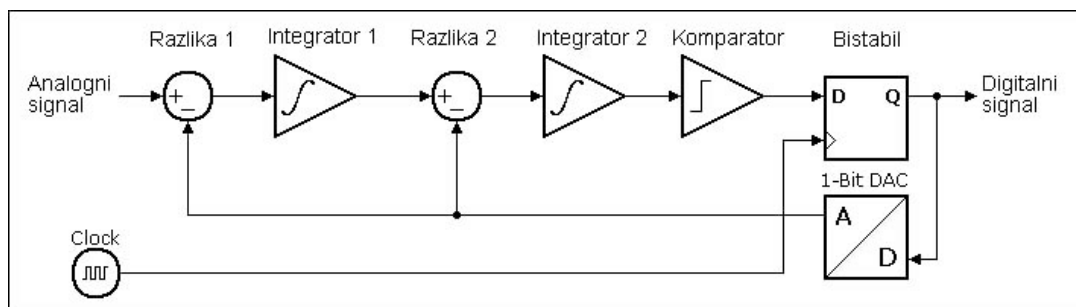


Slika 4.11 Shema sigma-delta A/D pretvarača.

Slika 4.12 prikazuje oblik signala na izlazu iz pojedinih stupnjeva pretvorbe. Kako bi se smanjila razina šuma koji se pojavljuje kod sigma-delta pretvorbe konstruirani su sigma-delta pretvarači višeg reda, koji uključuju nekoliko stupnjeva oduzimanja signala i integratora. Slika 4.13 prikazuje shemu sigma-delta pretvarača drugog reda.



Slika 6.12 Signali na izlazu iz pojedinih stupnjeva sigma-delta pretvorbe.



Slika 4.13 Shema sigma-delta A/D pretvarača drugog reda.

## 4.2 Pohrana podataka

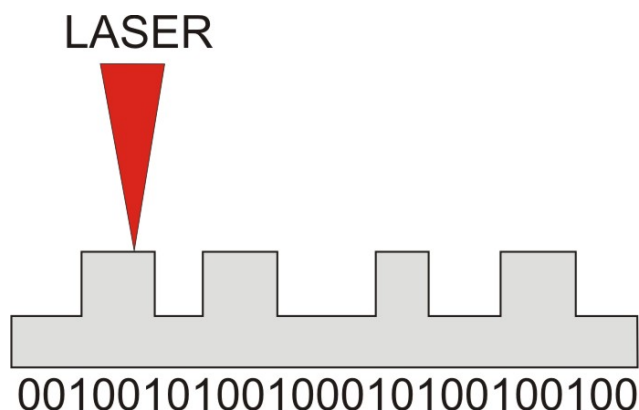
### 4.2.1 Optički disk

*CD*

Optički disk, u početku namijenjen samo za reprodukciju audio signala se na tržištu nalazi od 1982. Nastao je kao plod suradnje kompanija Philips i Sony. U Philipsu su razvili kod osam u četrnaest (EFM – Eight of Fourteen Modulation) koji se rabi za zapisa podataka na optičkom disku. Sony je razvio algoritam za ispravljanje pogrešaka CIRC.

Optički disk promjera 120 mm za čitanje i pisanje rabi lasersku zraku valne duljine 780 nm. Debljina diska je 1,2 mm a razmak između "trackova" je 1,6  $\mu\text{m}$ .

Zapis se bazira na udubinama i izbočinama na polikarbonatnoj površini. Presjek optičkog diska je dan na slici 4.14. Laserska zraka putuje po površini diska, koja je presvučena materijalom koji odbija svjetlost. Kada laserska zraka naiđe na "prijelaz" između udubine i izbočine, ili obrnuto, nema refleksije svjetlosti i foto dioda koja detektira svjetlost detektira nepostojanje signala. Dakle, čitanje sa optičkog diska se bazira na detekciji prelaska s udubine na izbočinu i obrnuto.



**Slika 4.14** Princip čitanja s optičkog diska.

Čitanje se odvija od sredine prema rubu diska s konstantnom kutnom brzinom. To znači da se brzina vrtnje mijenja od 1,2 do 1,4 m/s, odnosno 500 okr/min u sredini do 200 okr/min na rubu.

Struktura podataka se bazira na okvirima (frame) s ovakvim rasporedom: 33 bytes = 6 x 16 bits x 2 (stereo) + CRC kod (9 bytes). Svaki byte se pretvara u 14 bitnu riječ (EFM kod), uz 3 bita za "spajanje" riječi: 33 x (14+3)=561 bit. Dodaje se jedinstvena 27-bitna riječ za sinkronizaciju što je ukupno 588 bitova od čega se 192 odnosi na audio zapis. Ovi 588-bitni okviri se grupiraju u sektore gdje se svaki sektor sastoji od 98 okvira. CD reprodukcija se odvija sa 75 sektora/sek što odgovara 176,400 byte/sek a tome odgovara 44100 uzoraka u sekundi. Protok podataka CD-audio formata je 1.411.200 bita/sek.

### *DVD-Audio*

Ovaj audio format se ne smije zamjenjivati s DVD-Video formatom. Radi se o zapisu audio signala, koji omogućuje reprodukciju od mono zapisa do 5.1 surround zapisa. To je omogućeno različitim frekvencijama uzorkovanja i različitim kvantizacijama, te po potrebi kompresijom podataka, a ograničeno je kapacitetom diska koji se kreće oko 8,5 GB. Kod mono i stereo audio može se koristiti frekvencija uzorkovanja do 192 kHz s rezolucijom od 24 bita. Maksimalni protok podataka je 9,6 Mbit/sek. Koristi se linerani PCM format, nekompresiran ili kompresiran. Valna duljina lasera je 640 nm.

### *SACD*

Ovaj format je konkurencija DVD-Audio formatu. Za razliku od CD-a i DVD-audio zapisa ne koristi linearni PCM zapisa nego DSD (Direct Stream Digital) zapis, koji se bazira na 1-bitnoj sigma-delta modulaciji. Također se može pohraniti audio zapis od mono

do 5.1 surround formata. Kapacitet zapisa je 8,5 GB, a laser ima valnu duljinu od 650 nm. Na SACD je moguće snimiti tri formata: hibridni – koji predstavlja kombinaciju standardnog CD zapisa i HD sloja (SACD), kako bi bio kompatibilan s postojećim CD reproduktorima. Drugi format je single-layer, SACD jednoslojni zapis kapaciteta 4,7 GB, te treći dual-layer, dvoslojni SACD zapis kapaciteta 8,5 GB.

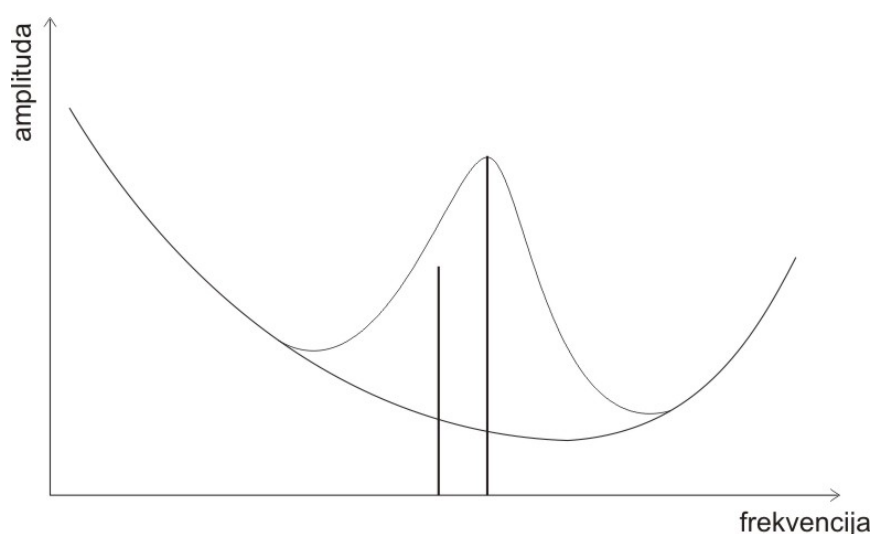
DSD format rabi frekvenciju uzorkovanja od 2,8224 MHz uz 1-bitnu kvantizaciju, tako da se teoretski postiže dinamika od 120 dB. Frekvencijski raspon se kreće do 100 kHz. Slično kao i kod sigma-delta modulacije, samo se ovdje ne koristi "decimation" filter za pretvorbu u standardni format. Protok podataka se kreće oko 2,8 Mbit/sek, a u nekim slučajevima se koristi lossless kompresija.

### 4.3 Kompresija audio podataka

S razvojem Interneta i prijenosa audio zapisa preko mreže, ukazala se potreba za smanjenjem protoka podataka audio zapisa. Ako bacimo pogled na protoke podataka audio zapisa bez kompresije, kao što je to slučaj kod CD-audio formata, onda vidimo da sekunda takvog zapisa zauzima dosta prostora. Kompresija audio zapisa je omogućila značajne uštede, kako u prostoru, tako i u zauzeću kanala, kao na primjer kod GSM komunikacija.

Kompresija audio zapisa se bazira na psihoakustičkim efektima, a najpoznatiji format je takozvani MP3 format, čiji naziv dolazi od službenog naziva MPEG-1 Audio Layer 3 format.

Ljudski sluh zbog psihoakustičkih efekata ima dosta rezerve, što znači da ako izbacimo neke informacije iz audio zapisa ljudsko uho neće uočiti nikakvu razliku. Slika 4.15 prikazuje slušnu plohu ljudskog uha, koja prikazuje način na koji ljudsko uho subjektivno čuje. Na prvom mjestu, ljudsko uho nije jednako osjetljivo na niske, visoke i srednje frekvencije. To znači da je raspon razina niskih frekvencija koje mi čujemo puno manji nego srednjih frekvencija. Dakle, za niske frekvencije ne moramo koristiti 16 bitnu kvantizaciju, nego manju. Drugi efekt na kojem se bazira kompresija audio podataka je efekt maskiranja. Glasniji ton jedne frekvencije će maskirati tiši ton bliske frekvencije. Dakle, ako izbacimo tu frekvencijsku komponentu to ljudsko uho neće čuti.

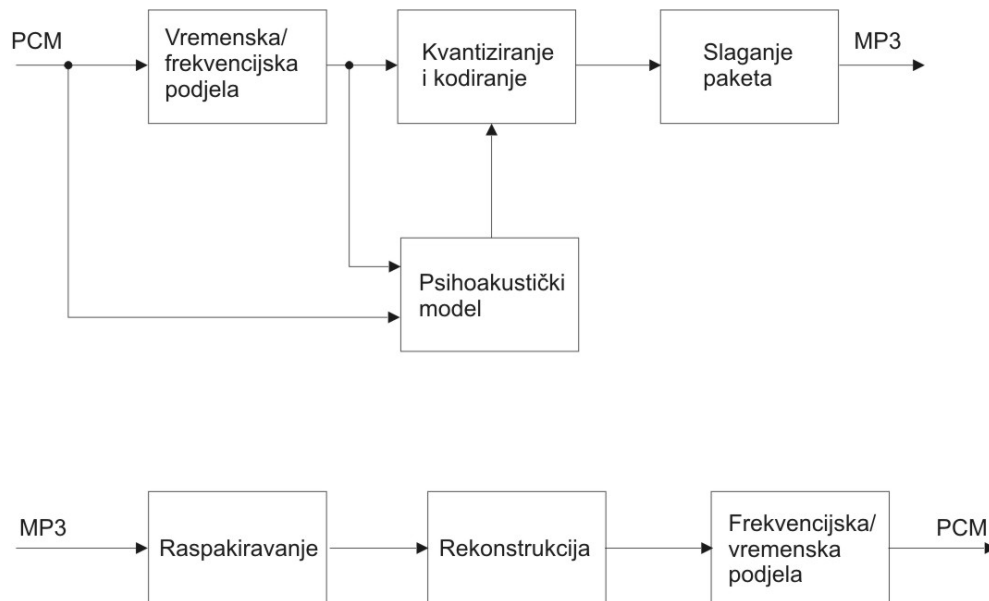


Slika 4.15 Slušna ploha ljudskog uha.

MP3 koder, uzima 576 uzoraka u vremenskoj domeni, koji se prebacuju u 576 polja u frekvencijskoj domeni. U slučaju tranzijentnih, brzih signala uzimaju se samo 192



uzorka. Kada ne bi bilo kompresije sva polja u frekvencijskoj, odnosno vremenskoj domeni bi se slala kroz komunikacijski kanal. Ako se u obzir uzmu psihoakustički efekti, neka polja se mogu izbaciti, što smanjuje ukupni protok podataka. Shema MP3 koda i dekodera je prikazana na slici 4.16.



**Slika 4.16** Shema MP3 koda i dekodera

MP3 zapis se sastoji od paketa, a svaki paket od MP3 zaglavlja (header) i MP3 podataka. MP3 zaglavlje može sadržavati razne informacije: sinkronizacijsku riječ, verziju MP3 koda, layer, zaštitu od grešaka, brzinu protoka (bit rate), frekvenciju uzorkovanja, mode 8stereo, joint stereo,...

MP3 zapis omogućuje i ubacivanje drugih podataka, kao što su naziv izvođača i pjesme, koji se zajednički nazivaju ID3 Tag.

Brzine protoka se kreću od 32 kbit/sek do 320 kbit/sek, sa frekvencijama uzorkovanja 32 kHz, 44,1 kHz i 48 kHz. Zapis može biti sa konstantnom brzinom protoka za svaki paket (CBR), promjenjivim protokom, koji se mijenja od paketa do paketa (VBR) ili nekim prosječnim protokom podataka (ABR).

Samo radi ilustracije, sekunda zapisa u CD-audio formatu zauzima oko 10 MB prostora, dok kod MP3 zapisa sa brzinom protoka od 128 kbit/sek oko 960 kbyte.

## 5. Miješala

Miješala, odnosno konzole, koje se na engleskom nazivaju *mixing consoles* imaju široku primjenu u audiotehnici. Bez njih je nezamislivo bilo kakav ozbiljniji sustav ozvučenja, od najmanjih u kafićima do velikih ozvučenja koncerata.

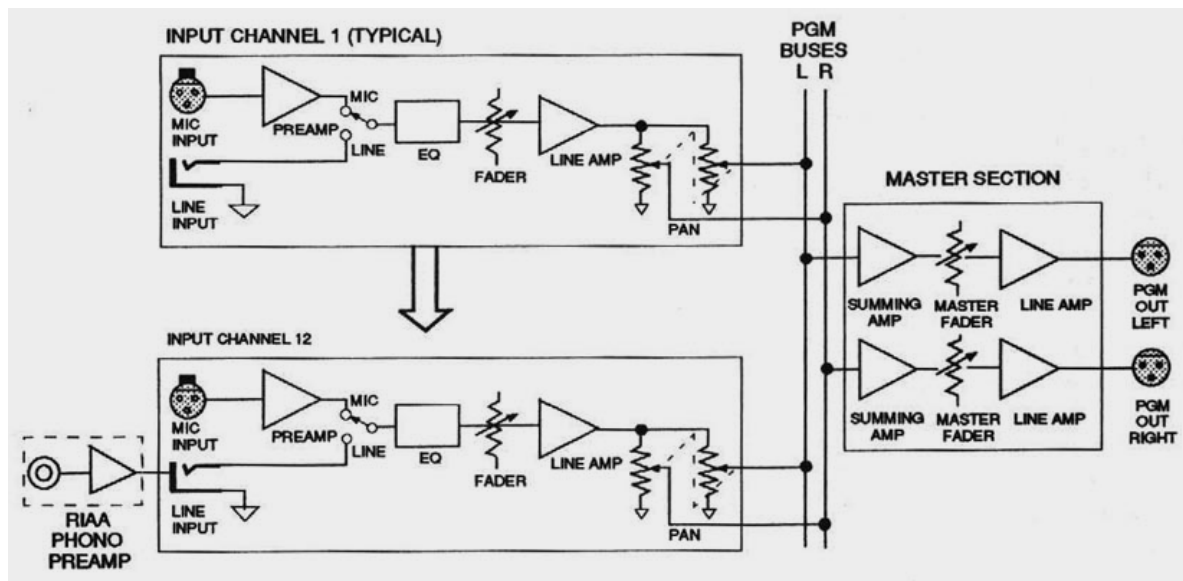
Osnovni zadatak svakog miješala signala, kako njegovo ime kaže, je miješanje signala, odnosno njihovo zbrajanje u jedan signal, koji se šalje na zvučnike, uređaje za snimanje ili neko drugo miješalo. Dakle, u osnovi miješala služe za kontrolu toka audio signala.

Današnja miješala, pa čak i ona najjednostavnija imaju dodatne mogućnosti obrade signala, te izbora vrste ulaza i slično. Dakle, samo najjednostavnija miješala će služiti za "zbrajanje" signala, dok će napredniji modeli nuditi i nešto više.

Miješalo u rukama inženjera koji zna svoj posao može postati "alat" s kojim "oblikuje" audio signal. O njemu će dosta ovisiti kvaliteta reprodukcije, te konačni dojam slušanja. Stoga je poznavanje osnovnih načina i metoda miješanja signala dosta bitno.

### 5.1 Osnovno miješalo

**Osnovno miješalo** (*mixer*) omogućuje miješanje signala i kontrolu glasnoće pojedinih signala koji ulaze u miješalo. Ti signali se nakon toga usmjeravaju prema izlazu iz miješala, gdje se može regulirati glasnoća tako zbrojenih signala. Ovakva vrsta miješala se najčešće rabi za neke manje sustave ozvučenja, kao što je u kafićima, školama, odnosno manjim razglasnim sustavima. Postoji mogućnost samo osnovne obrade signala, ako što je na primjer regulacija glasnoće, te regulacija niskih i visokih tonova. Nema mogućnosti ubacivanja vanjske obrade signala. Izlaza iz ovakvih miješala najčešće se direktno šalje u pojačalo snage, a nakon njega u zvučnike. Slika 5.1 prikazuje osnovnu shemu jednog takvog miješala. Vidljivo je da se može birati vrsta ulaza, mikrofonski ili linijski. Zbog relativno niske razine signala iz mikrofona, oni moraju imati dodatno pretpojačalo, a u slučaju kondenzatorskog mikrofona i dodatno napajanje (*phantom*). Broj kanala može varirati, ali je obično dosta manji nego u slučaju konzole.



Slika 5.1 Shema osnovnog miješala

## 5.2 Konzola za miješanje

**Konzole za miješanje** (*mixing console*) su naprednija miješala, koja osim osnovnih mogućnosti regulacije pružaju mogućnost dodatne obrade signala i usmjeravanja signala. Konzole su bolje prilagođene različitim vrstama ulaznih signala, kako bi se mogla bolje iskoristiti na većim koncertima gdje postoji veliki raspon instrumenata, pjevača i inih izvora zvuka. Na jako velikim koncertima konzole za miješanje dolaze u kombinaciji s manjim konzolama, koje se nalaze direktno uz orkestar. Ako je poznati podatak da za ozvučavanje "baterije" bubnjeva na rock koncertu treba 12 mikrofona, onda je jasna uloga konzola. Za signal iz svakog mikrofona mora negdje postojati neki ulaz, kako bi se mogao precizno namjestiti. Osim toga tu su gitare, klavijature, vokali, back vokali, i tako dalje. Dakle raspon signala je dosta širok, a za svaki treba postojati jedan ulaz.

Izlaz iz konzola se šalje u razne druge uređaje, pojačala i uređaje za snimanje. Prvo, signal iz mikrofona se šalje na monitore na pozornici ili sve češće slušalice, tako da glazbenici mogu sami sebe čuti, i na taj način pjevati u pravilnom tonalitetu.

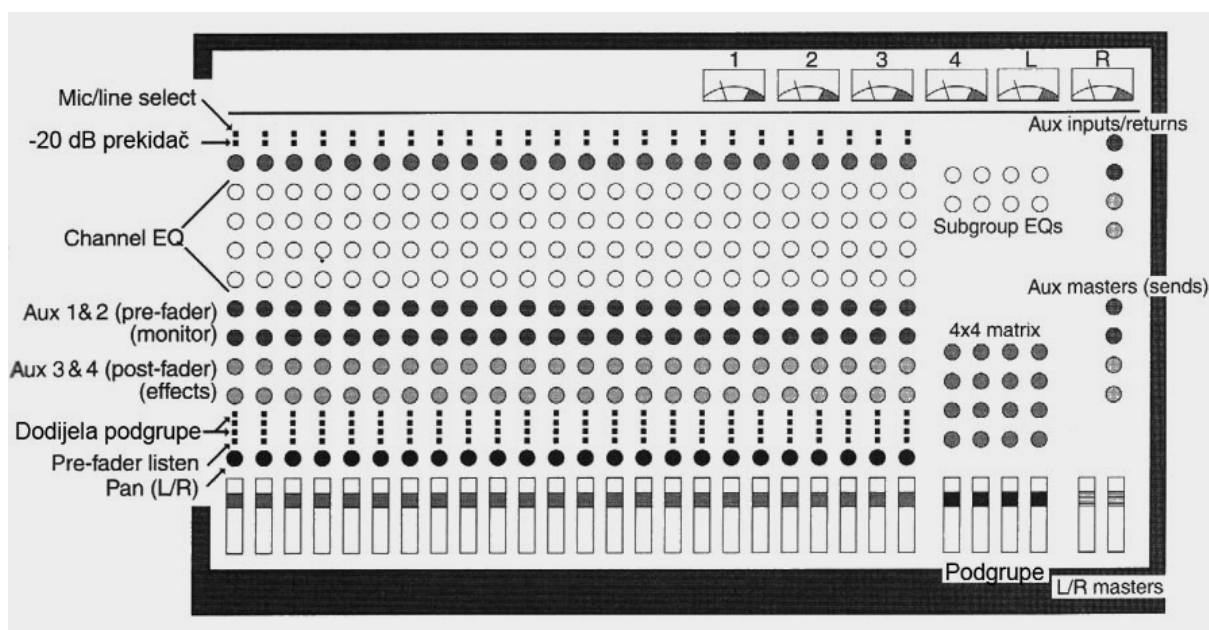
Drugo, ako se radi o koncertu, signal se mora poslati na sustav ozvučenja, odnosno na ojačala snage, te zvučnike. Prije toga, signal bi trebao proći kroz kompresore, odnosno limitere, kako ne bi došlo do pojave izobličenja, te kako bi se zaštitila oprema iza konzole.

Treće, ako se želi snimiti cijeli koncert, signal iz konzole se može slati u uređaje za snimanje, ili direktno u TV prijenos.

Jednako vrijedi i za konzole koje se nalaze u studijima i služe za snimanje albuma i slično. Broj kanala kod takvih konzola može biti jako velik i kreće se do čak 64 ulaza.

Kao što je već rečeno, ono po čemu se razlikuje konzola od standardnog miješala, su mogućnosti obrade signala. Konzole imaju puno više mogućnosti takve obrade, te nude mogućnost uključivanja vanjskih uređaja za obradu signala u tok signala.

Slika 5.2 prikazuje osnovnu konfiguraciju konzole. Konzola se sastoji od ulaznih kanala, koji pružaju mogućnost obrade samo tog signala, od podgrupa, izlaznih kanala i u nekim slučajevima dodatne matrice, koja omogućuje još više mogućnosti usmjeravanja signala.



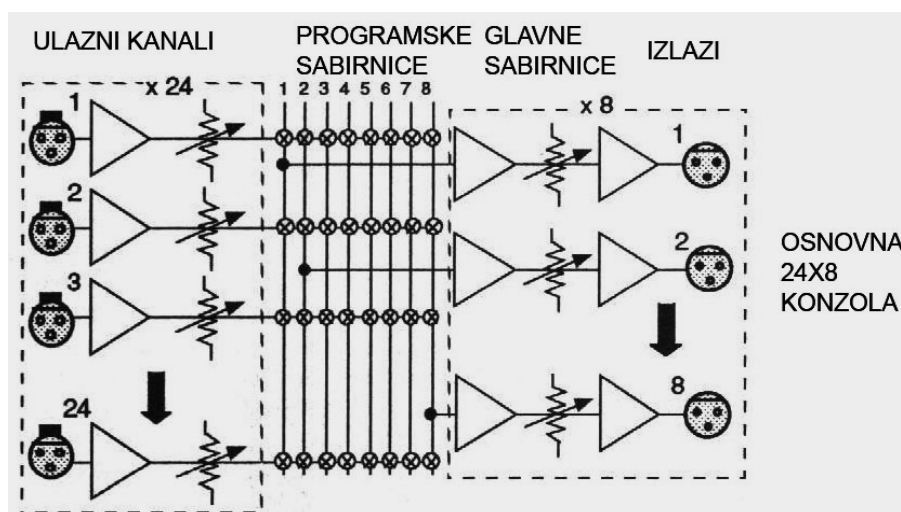
Slika 5.2 osnovna konfiguracija konzole.

Svaki ton majstor, odnosno audio inženjer, koji je zadužen za miješanje signala, prvo mora svakom instrumentu, odnosno izvoru signala dodijeliti određeni kanal na konzoli. Tako se obično grupiraju mikrofoni od vokala, signala iz pojedinih instrumenata, signala iz mikrofona za ozvučavanje "baterije" bubnjeva, i tako dalje. Na taj način je miješanje signala preglednije i kudikamo lakše. Nakon toga se svaka ta grupa kanala šalje u neku od podgrupa, gdje se može regulirati glasnoća, te postavke ekvalizatora samo te grupe signala. Nakon toga se sve podgrupe ponovo miješaju i šalju na izlaze, bilo stereo ili mono, ovisno o sustavu ozvučenja.

Osim toga se pojedini signali iz kanala, ili grupe kanala mogu slati nazad na pozornicu u monitorske zvučnike ili slušalice izvođača. Ako je potrebno snimanje signala, konačni miks se može slati u uređaj za snimanje.

### 5.3 Konfiguracije konzola

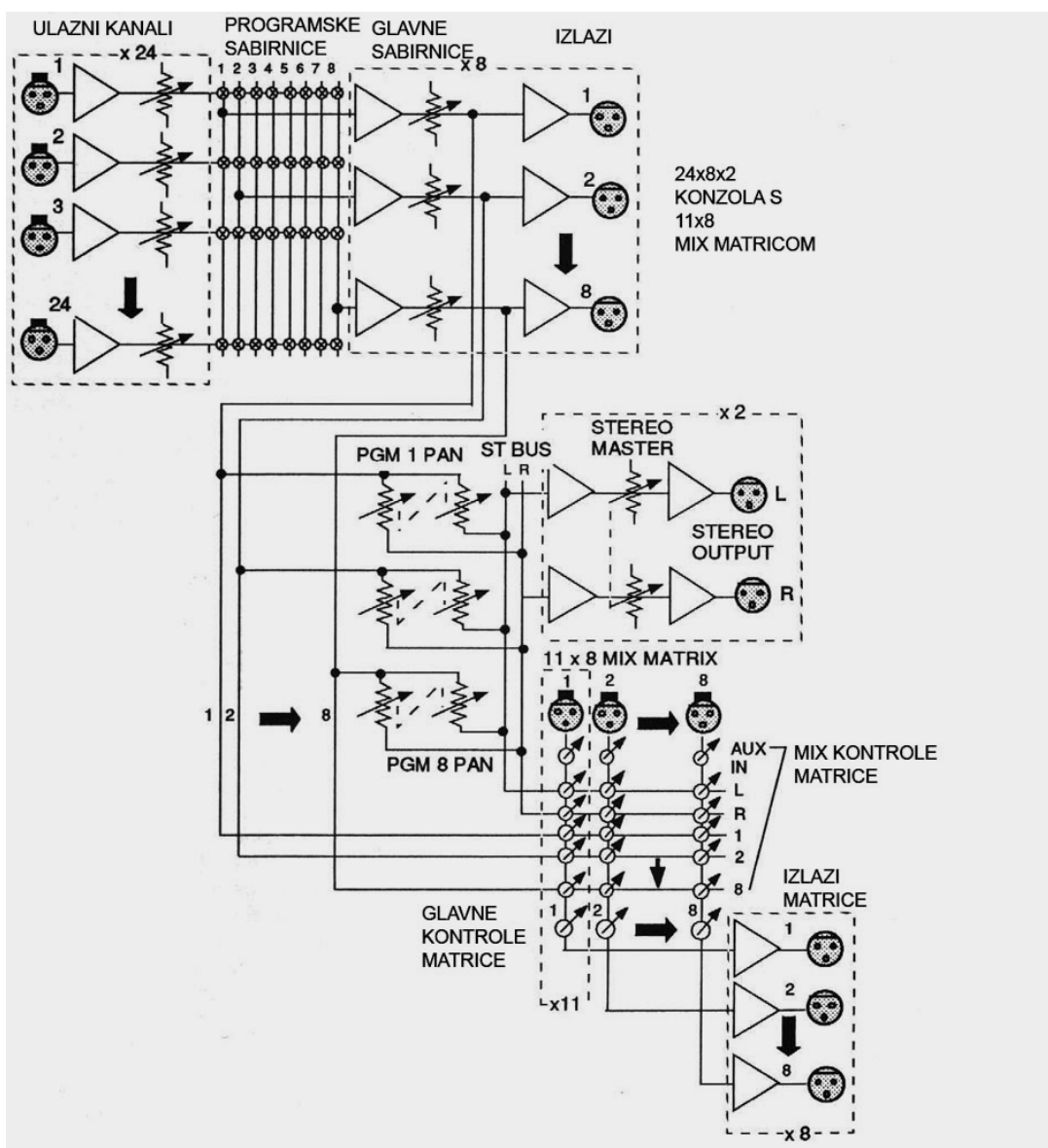
Druga razlika između konzola i miješala je broj ulaza, odnosno broj izlaza. Dok se kod miješala broj ulaza kreće oko malog broja, kod konzola on može biti velik. Kako bi se razlikovale konzole i miješala, uvedena je oznaka koja je zajednička za jedne i druge. Na primjer konzola sa 24 ulaza i 8 izlaza će imati oznaku 24x8. Na slici 5.3 dana je shema jedne takve konzole, odnosno miješala. U ovom slučaju na ulaz u konzolu možemo spojiti samo 24 izvora signala, a konačni signal možemo slati na 8 izlaza. Kako će se organizirati raspodjela kanala prema broju instrumenata, odnosno izvora zvuka ovisi o ton majstoru. Ako je broj kanala premali, moguće je uvesti dodatna manja miješala za pojedine grupe instrumenata ili vokale, a signal iz njih se onda šalje u glavnu konzolu.



Slika 5.3 24x8 konzola

Složenija konfiguracija će nositi oznaku 24x8x2, koja označava 24 ulaza, 8 mono izlaza i 2 stereo izlaza. U ovom slučaju je omogućeno dodatno usmjeravanje signala, na primjer u slučaju višekanalnog snimanja u studiju, gdje se želi snimiti signal pojedinih instrumenata i vokala, bez da se miješaju s ostalim signalima. To omogućuje naknadnu obradu, odnosno miješanje signala bez prisutnosti orkestra. Shema jedne takve konzole je prikazana na slici 5.4. Signali iz pojedinih kanala se šalju u programske sabirnice, koji ovdje ima osam. Svaka sabirnica ima svoj izlaz, uz mogućnost dodatne regulacije glasnoće. Osim toga signali iz svih osam sabirnica se mogu pomiješati u dva stereo kanala, lijevi i desni, uz regulaciju panorame (*pan*), odnosno određivanja koliki će dio signala biti

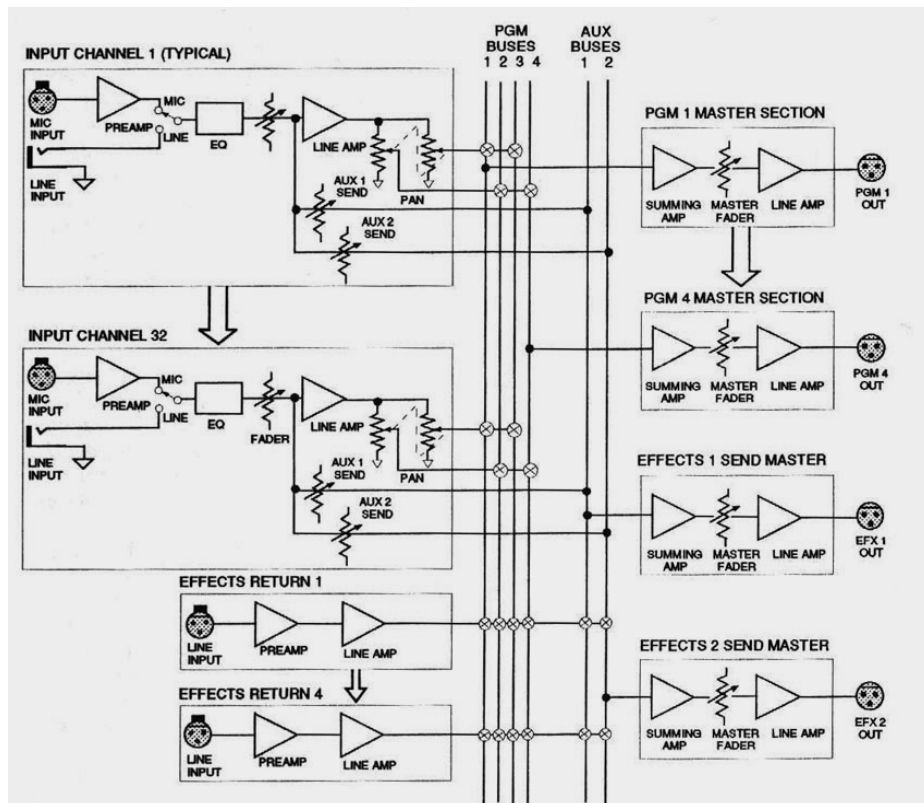
poslan u lijevi odnosno desni kanal. Nakon toga slijedi i matrica, kod koje se signali iz svih sabirnica i stereo kanala mogu dodatno usmjeravati.



Slika 5.4 24x8x2 konzola.

Prednost konzola prema miješalima je u većim mogućnostima obrade i usmjeravanja signala. Svaki pojedini kanal ima relativno velike mogućnosti obrade signala, a one ovise o vrsti konzole, proizvođaču i tako dalje. Uobičajena konfiguracija kanala jedne konzole je prikazana na slici 5.5. Kao što se može vidjeti signal prolazi kroz niz stupnjeva obrade, koji se mogu po potrebi preskočiti. Osim toga postoji mogućnost slanja signala iz ovog kanala van na dodatni uređaj za obradu (na primjer uređaj za kašnjenje, reverb,...), te vraćanje tog signala nazad u taj isti kanal ili u novi kanal na konzoli.

Slika 5.6 prikazuje shemu organizacije konzole, s dodatnim kanalima za primanje signala iz vanjskih efekata.



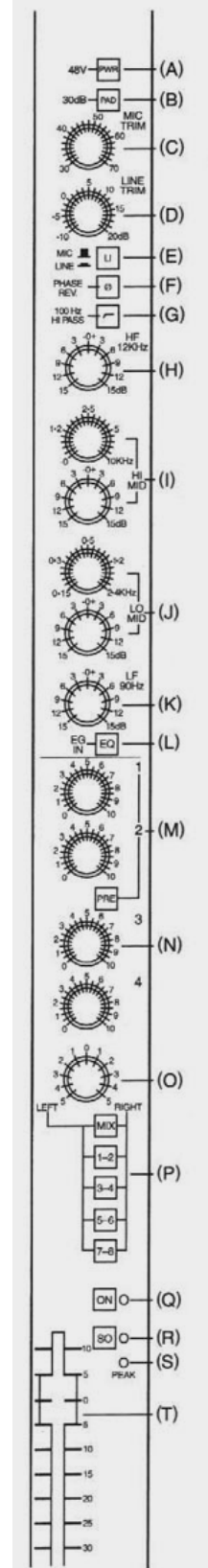
Slika 5.6 Shema konzole s kanalima za vraćanje signala iz vanjskih efekata.

Sada ćemo malo pobliže objasniti svaki pojedini dio ulaznog kanala. Prvi dio se odnosi na **odabir i regulaciju ulaznog signala**. Kao što je već spomenuto signali koji ulaze u konzolu mogu biti različitih razina, od jako niskih iz mikrofona, do relativno visokih iz klavijatura koje imaju svoja pretpojačala. O odabiru vrste ulaza, koji određuje početno pojačanje dosta ovisi i način regulacije poslije tog kanala. Ako je razina premala, taj kanal će trebati veliko pojačanje na njegovom izlazu, što može povećati i šum. S druge strane ako je prevelika može doći do izobličenja, odnosno smanjenje kvalitete reprodukcije.

Tipka (A) na slici 5.5 se odnosi na fantomsko napajanje od 48 V. Kao što je spomenuto fantomsko napajanje je potrebno za napajanje kondenzatorskih i nekih elektretskih mikrofona. Bez fantomskog napajanja ti mikrofoni neće raditi. Tipka (B) služi za trenutno pojačanje signala, u ovom slučaju od 30 dB. Ova tipka se obično koristi u kombinaciji s potencimetrima (C) ili (D), koji služe za fino namještanje pojačanja ulaznog signala, u ovom slučaju za dvije vrste priključaka. Položaj potencimetara (C) ili (D), te tipke (B) mora biti dobro usklađen s glavnim potencimetrom (T), kako bi se postigla nominalna razina miješanja signala.

Tipka (E) služi za odabir vrste ulaza, mikrofonskog ili linijskog. To automatski određuje i razinu početnog pojačanja i povezano je s potencimetrima (C) i (D), te tipkom (B).

Tipka (F) služi za okretanje faze signala. Ponekad se može dogoditi da pojedini signal iz mikrofona nije u fazi sa svim ostalim signalima, što ovisi o njegovom položaju.



Slika 5.5

Na primjer, za ozvučavanje *sneare* udaraljki u bateriji bubnjeva se obično koriste dva mikrofona. Jedan blizu, a jedan malo udaljen, kako bi se mogli uhvatiti određeni efekti. Ako se mikrofoni postave u određeni položaj, može doći do poništavanja signala iz njih zato što nisu u fazi na određenim frekvencijama. U tom slučaju je potrebno okrenuti fazu signala iz jednog od ta dva mikrofona.

Slijedeći dio kontrola se odnosi na takozvanu **EQ sekciju**. Kako samo ime kaže u ovom dijelu se može regulirati frekvencijska karakteristika pojedinog kanala. To je dosta važan dio svakog kanala, jer nam omogućuje da fino namjestimo kvalitetu reprodukcije pojedinog izvora signala. Na izlazima konzola se obično postavlja glavni ekvalizator, ali on regulira cjelokupni pomiješani signal, i obično se rabi za namještanje frekvencijskog odziva prostorije, ili korekciju nedostataka zvučničkog sustava. Ekvalizator u svakom kanalu nam omogućuje regulaciju i namještanje pojedinog instrumenta, vokala, i slično. To je pogotovo važno ako se želi postići pravi tonalitet vokala. Tako obrađeni signal se šalje u monitore na pozornici ili slušalice pjevača. Ako frekvencijska karakteristika vokala nije dobro ugođena, pjevač možda neće postići pravi tonalitet.

Tipka (G) se koristi za uključivanje i isključivanje visoko-propusnog filtra s graničnom frekvencijom od 100 Hz. Najčešće se rabi za "rezanje" niskih frekvencija za vokale i instrumente koji ne reproduciraju niske frekvencije.

Potenciometar (H) služi za regulaciju razine visokih frekvencija iznad frekvencije od 12 kHz. Dva potenciometra oznake (I) predstavljaju pojasni filter za srednje/visoke frekvencije, kojemu se može regulirati središnja frekvencija i razina. Sito vrijedi za dva potenciometra oznake (J), koji se odnose na srednje/niske frekvencije. Potenciometar (k) služi za regulaciju razine niskih frekvencija ispod 90 Hz.

Tipka (L) služi za uključivanje i isključivanje cijele EQ sekcije, odnosno njeno ubacivanje, odnosno izbacivanje iz toka signala.

Slijedeća grupa kontrola se odnosi na slanje signala van iz kanala. Potenciometri s oznakom (M) se odnose na vanjske izlaze AUX 1 i 2. Dakle signal iz kanala se može slati na ova dva vanjska izlaza prije ili poslije glavnog potenciometra u kanalu. Za to služi tipka koja se nalazi uz ova dva potenciometra (PRE). Ova dva izlaza se najčešće koriste za slanje signala u monitore odnosno slušalice na pozornici.

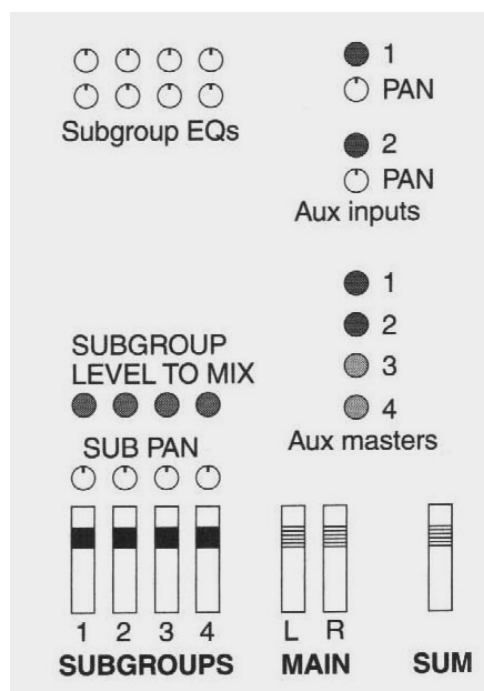
Potenciometri s oznakom (N) se odnose na vanjske izlaze AUX 3 i 4, koji ovisno o izvedbi konzole također imaju tipku PRE. Oni se obično koriste za slanje signala u vanjske efekte (delay, reverb, chorus, ...)

Tipka (O) služi za regulaciju panorame, odnosno regulaciju slanja signala u lijevi i desni kanal. U danoj konfiguraciji lijevi kanal predstavljaju podgrupe neparnih brojeva, a desni parnih.

Na kraju se nalazi dio za **usmjeravanje signala i regulaciju glasnoće**. Pomoću tipki (P) se određuje u koju podgrupu će se signal slati. Tipka (Q) služi za uključivanje i isključivanje cijelog kanala. Tipka (R) služi za slanje signala iz kanala u slušalice na glavi ton majstora, tako da ga on može preslušavati bez da mu smetaju ostali signali. Lampica (S) nam pokazuje da li je signal u kanalu došao do maksimalne vrijednosti (*clipping*), a oznaka (T) se odnosi na klizni potenciometar za regulaciju glasnoće signala koji izlazi iz kanala.

Signali iz kanala se preko sabirnica šalju u podgrupe. Na slici 5.7 prikazana je jedna konfiguracija izlaznog dijela konzole. Svakoj podgrupi je moguće regulirati glasnoću, tako da na primjer s jednim potenciometrom možemo regulirati glasnoću svih vokala ili svih

gitara. Osim toga postoji mogućnost dodatnog ekvaliziranja, odnosno regulacije frekvencijske karakteristike. Signali iz podgrupa se dodatno miješaju i šalju u stereo kanale, te u glavnu sumu svih kanala. Tu su također potencijometri za regulaciju glasnoće dodatnih izlaznih kanala, ako se za to ukaže potreba.



Slika 5.7 Izlazna konfiguracija konzole.

Osim toga, u nekim izvedbama konzola postoji takozvana matrica, koja omogućuje dodatno usmjeravanje signala na izlaze, odnosno na dodatne uređaje, na primjer za snimanje. Na slici 5.8 prikazana je jedna takva konfiguracija matrice. Na primjer signal iz podgrupe 1 (SUB 1), koji se odnosi na zbroj svih vokala, se šalje u kanal 1 uređaja za snimanje (MATRIX 1), kanal 2 uređaja za snimanje, ali s manjom razinom (MATRIX 2). Bubnjevi (SUB 4) se šalju samo u kanal 4 uređaja za snimanje (MATRIX 4).



Slika 5.8 Matrica



## 5.4 Digitalna miješala

S razvojem digitalne tehnologije, usporedno su se razvijala i digitalna miješala, odnosno konzole. Takva miješala imaju brojne prednosti, ali i neke nedostatke.

Osnovni princip digitalnih miješala je u tome da se sva obrada odvija u digitalnoj domeni. To znači da se na ulazu signala nalaze A/D pretvarači, prikladne dinamike i kvalitete. Nakon toga se signal u digitalnom obliku šalje na daljnju obradu. U tu svrhu se najčešće koriste digitalni procesori (DSP) koji su danas tako napredovali da omogućuju kompletnu obradu signala, od ekvalizatora do kompresora. Digitalni signali su puno manje podložni smetnjama tako da je dinamika takvih sustava ograničena samo s brojem bitova s kojima se vrši kvantizacija.

Prednost digitalnih konzola je u tome što se sve postavke konzole mogu memorirati. Na primjer svi položaji potencijometara, prekidača i regulatora se mogu snimiti, i vratiti u prvotni položaj ako se za to ukaže potreba.

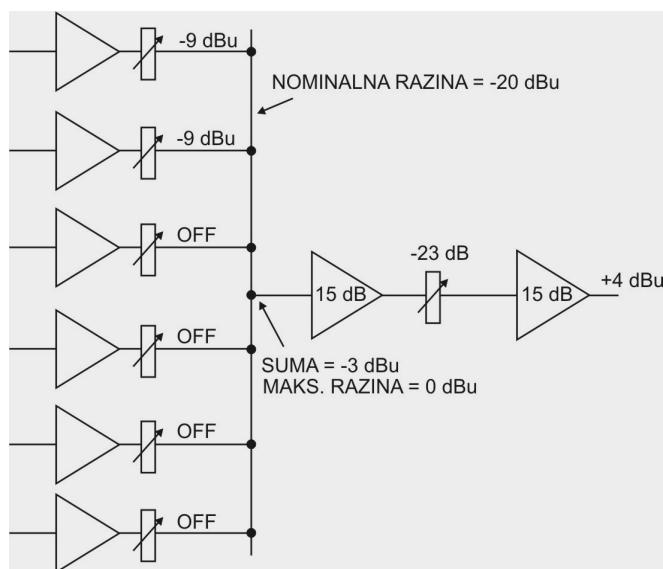
Osim toga je olakšana i automatska kontrola parametara, tako da u nekim slučajevima nije niti potreban ton majstor.

Kontrola pomoću računala je olakšana, a rezultat miješanja signala se može vrlo lako pohraniti na tvrdi disk računala.

Nedostatak digitalnih konzola je kašnjenje signala, koje se neminovno javlja kod A/D i D/A pretvorbe. Zbog toga može doći do problema kod reprodukcije, jer signal reproduciran preko zvučnika može kasniti za signalom koji odsvira instrument ili otpjeva pjevač. To stvara probleme i samim glazbenicima, jer signal koji čuju u slušalicama kasni za signalom koji su odsvirali.

## 5.5 Namještanje razina

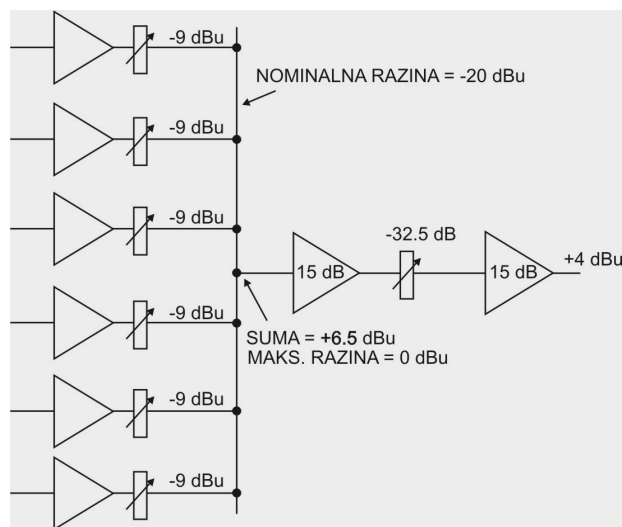
Namještanje razina u samom sustavu miješala nije jednostavno, jer postoji puno parametara na koje treba misliti. Treba znati da kada se zbroje dva signala jednakih razina, ukupna razina poraste za 6 dB ( $20 \log 2$ ). Ako se pravilno ne namjeste razine pojedinih kanala i podgrupa, sustav će brzo doći do izobličenja, odnosno do gornje granice razine signala.



Slika 5.9 Principijelna shema miješala.

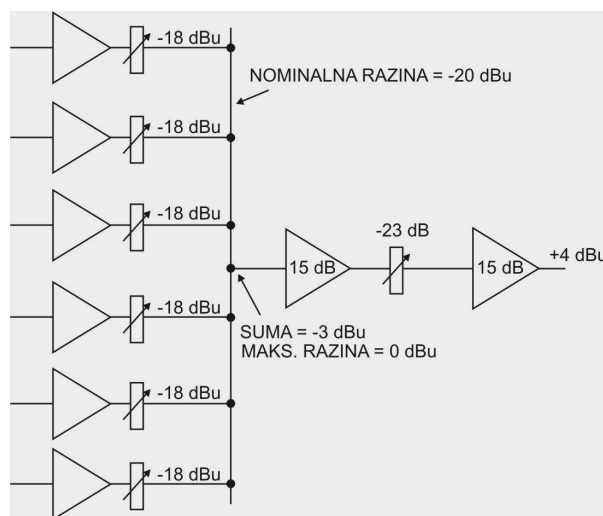
Na slici 5.9 prikazana je principijelna shema miješala s time da su uključena samo dva ulazna kanala razine  $-9$  dBu. Kada se zbroje, na ulazu prvog pojačala razina signala će biti  $-3$  dBu. Maksimalna dozvoljena razina na ulazu tog pojačala je  $0$  dBu. Pojačanje pojačala je  $15$  dB, tako da je razina signala nakon pojačala  $12$  dBu. Nakon toga se signal šalje kroz potencijometar koji signal prigušuje za  $-23$  dB, tako da je razina signala nakon potencijometra  $-11$  dBu. Nakon toga slijedi izlazno pojačalo s pojačanjem  $15$  dB, tako da je razina na izlazu iz miješala  $4$  dBu.

Analizirajmo slijedeću situaciju. Pretpostavimo da se uključe svi ostali kanali miješala na čijim izlazima je razina signala također  $-9$  dBu kako je prikazano na slici 5.10. Tako zbrojeni signali će dati ukupnu razinu od  $+6,5$  dBu, koja je veća od granične razine prvog pojačala, tako da dolazi do izobličenja. Kako bi se zadržao signal na izlazu od  $+4$  dBu, potrebno je gušenje potencijometra postaviti na  $-32,5$  dB.



**Slika 5.10** Principijelna shema miješala.

Ovaj problem se može jedino riješiti da se ulazna razina svih signala smanji, a time i smanji razina signala na izlazu svakog kanala, kao što je prikazano na slici 5.11. U tom slučaju će zbroj svih kanala dati razinu od  $-3$  dBu, što je ispod granične razine, tako da ne dolazi do izobličenja.



**Slika 5.11** Principijelna shema miješala.

## 6. Pojačala snage

Pojačala snage su uređaji koji audio signal pojačavaju i prenose snagu na zvučnik, gdje se električna snaga pretvara u zvučnu snagu. Postavlja se pitanje zašto nam uopće trebaju pojačala snage?

Ako znamo da je iskoristivost prosječnog zvučnika ispod 1%, te znamo da 1 W akustičke snage odgovara razini zvučnog tlaka od 120 dB, onda je jasno da za postizanje ove razine treba dovesti oko 100 W električne snage na zvučnik. Tu ulogu dovodenja snage igraju pojačala snage.

Na primjer ako je nazivni otpor zvučnika  $8 \Omega$ , to znači da će 100 W uzrokovati da kroz zavojnicu teče struja od 3,5 A. Razina napona pri tome mora biti oko 28,3 V efektivno. Ako bi pojačalo radilo samo od operacijskih pojačala, ona bi brzo pregorila. Dakle, treba nam sklop koji će moći bez problema prenijeti struju do desetak A, i napone do stotinjak volti.

Prva podjela pojačala snage se odnosi na njihovo područje primjene. Iako se na prvom mjesto stavlja kvaliteta reprodukcije, u nekim primjenama se važnost pridaje i izdržljivosti, odnosno robusnosti.

U studijima za snimanje se mogu naći pojačala različitih kvaliteta, od visoko kvalitetnih *high-end* pojačala do onih niske kvalitete za široku potrošnju. Ton majstor u studiji, kada radi završnu obradu nekog albuma, mora uzeti u obzir da će se taj budući CD svirati na raznim uređajima, od kućnih audio sustava, do automobila, tako da završni miks mora propustiti kroz sve sustave, kako bi ujednačio kvalitetu reprodukcije.

Što se tiče sustava ozvučenja koncerata, kvaliteta reprodukcije je jednako važna kao i robusnost. Na koncertima, pogotovo onima na otvorenom, gdje su potrebne visoke razine zvučnog tlaka, važno je da sustav radi bez problema. To znači da ako poraste okolna temperatura, neće doći do kvarova. Također, pojačala rade u blizini svojih maksimalnih mogućnosti, odnosno najvećih opterećenja, pa to trebaju izdržati. Dakle, kvaliteta izrade i konstrukcije je na visokom mjestu po važnosti.

Za kućne potrebe, teži se visoko vjernoj reprodukciji. Dakle kvaliteta reprodukcije je na prvom mjestu. To najčešće određuje i klasu pojačala koja će se koristiti, tako da ako se traži jako kvalitetna reprodukcija, koristiti će se pojačala klase A.

Pojačala za široku potrošnju, koja se ugrađuju u razne audio sustave, imaju dobar odnos kvalitete i cijene, dakle traži se nekakav prosjek.

Dakle, prije početka konstrukcije pojačala, treba biti jasno gdje će se ono koristiti, što će odrediti na što treba najviše obratiti pažnju.

### 6.1 Osnovne izvedbe pojačala snage

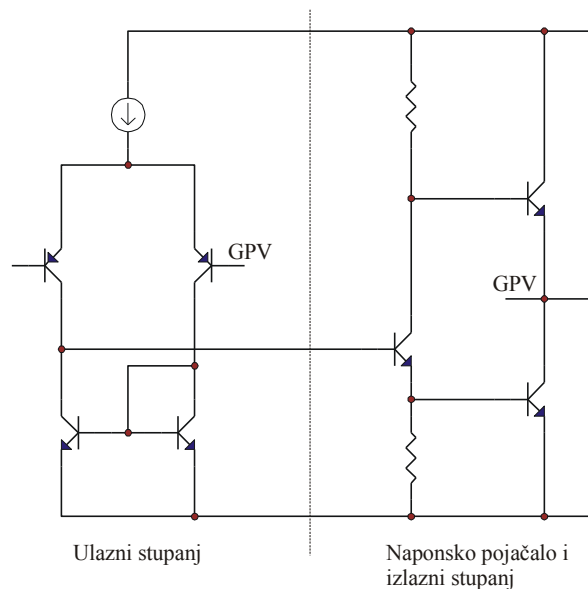
Kada se usporedi shema operacijskog pojačala i standardnog pojačala snage, može se uočiti da su vrlo slične, samo što se u pojačalu snage radi o puno većim strujama i naponima.

Danas se najčešće koriste dvije osnovne izvedbe pojačala snage: trostupanjsko i dvostupanjsko, koje su prikazane na slikama 6.1a i 6.1b.

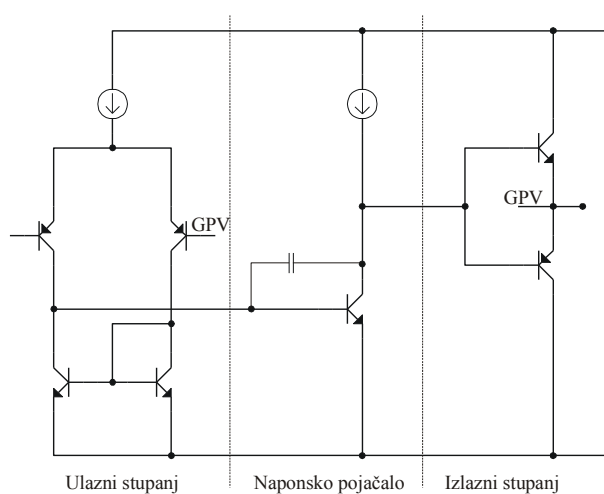
Svaki od stupnjeva koji čine pojačalo ima određenu ulogu. Mogu se prepoznati tri osnovna stupnja: ulazni stupanj, naponsko pojačalo i izlazni stupanj.

Ulazni stupanj ima za zadatak pojačati razliku između ulaznog signala i signala koji se dovodi povratnom vezom. Zbog toga se najčešće koristi konfiguracija diferencijalnog pojačala. Ulazni stupanj mora biti stabilan što se tiče promjene napona napajanja i

promjene okolnih parametara, kao što je na primjer temperatura. U tu svrhu se najčešće koriste diferencijska pojačala sa strujnim izvorom. Strujni izvori predstavljaju dobro rješenje jer ne predstavljaju veliko opterećenje diferencijskog pojačala, pa na njima nema velikog pada napona. Odabir vrste strujnog izvora dosta utječe na kvalitetu reprodukcije, odnosno izobličenja, cijelog pojačala.



**Slika 6.1a** Dvostupanjsko pojačalo.



**Slika 6.1b** Trostupanjsko pojačalo.

Još jedna važna stvar kod diferencijskog pojačala je ujednačavanje struje u granama tog pojačala. To se postiže sklopom nazvanim strujno ogledalo. Na taj način se postiže da to pojačalo bude čisto diferencijsko, odnosno da pojačava razliku signala, a prigušuje istovjetne signale.

Naponsko pojačalo, koje čini drugi stupanj, ili može biti spojeno sa izlaznim stupnjem, služi za podizanje razine signala na potrebnu razinu za pokretanje zvučnika. Dakle, ono je odgovorno za cjelokupno naponsko pojačanje pojačala snage. Kao i u slučaju ulaznog stupnja postoje razne izvedbe naponskog pojačala, a svaka izvedba ima svoje prednosti i nedostatke.

Izlazni stupanj je zadužen za pojačanje struje, kako bi se s naponom iz naponskog pojačala postiglo potrebno pojačanje snage. Izvedba izlaznog stupnja određuje klasu pojačala. Klase pojačala se razlikuju po načinu na koji rade izlazni tranzistori, a određuju i omjer kvalitete i disipacije topline na izlaznim tranzistorima.

Klase pojačala:

**A:** mirna struja teče kroz cijelu periodu signala; mala izobličenja; velika disipacija topline; najveće teoretsko iskorištenje 50%.

**AB:** kombinacija klasa A i B; ovisno o razini mirne struje; izlazni stupanj provodi više od  $180^\circ$  poluperiode signala; manja izobličenja od klase B, ali i veća disipacija.

**B:** teče mirna struja dovoljna za kompenzaciju pada napona na spoju baza-emiter; relativno veća izobličenja, manja disipacija.

**C:** izlazni stupanj vodi manje od  $180^\circ$  poluperiode signala; ne koristi se u audiotehnici

**D:** takozvana "digitalna" pojačala; pulsno-širinska modulacija, veća izobličenja, visoka korisnost, teoretski 100%.

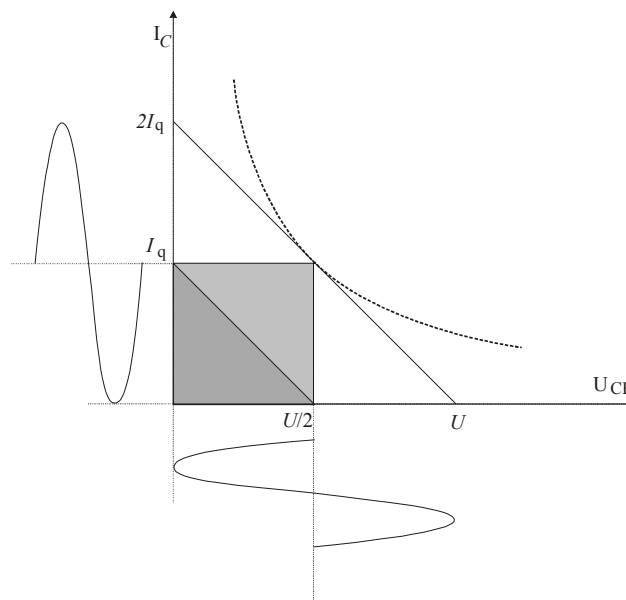
**G:** kombinacija dvije klase B; dvije razine napona napajanja

**H:** automatsko namještanje napona napajanja prema razini signala

**S:** pojačalo klase A niske snage, koje daje snagu opterećenju preko pojačala klase B.

## 6.2 Klasa A

U klasi A, radna točka izlaznih tranzistora je tako postavljena da kroz njih stalno teče mirna struja relativno visoke vrijednosti. Postavljanjem radne točke na sredinu radnog pravca, željelo se dobiti da izlazni tranzistori rade u svom linearnom području. Slika 6.2 prikazuje radni pravac izlaznih tranzistora. U tom slučaju svaki od tranzistora vodi punu periodu signala.

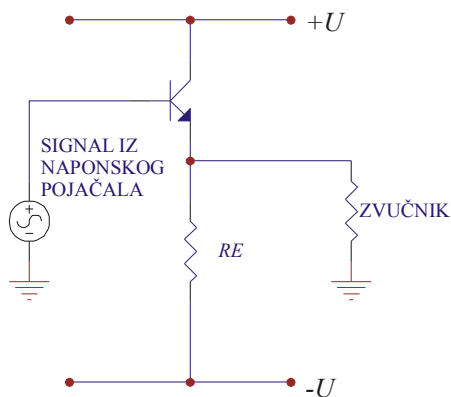


**Slika 6.2** Radni pravac izlaznih tranzistora u klasi A.

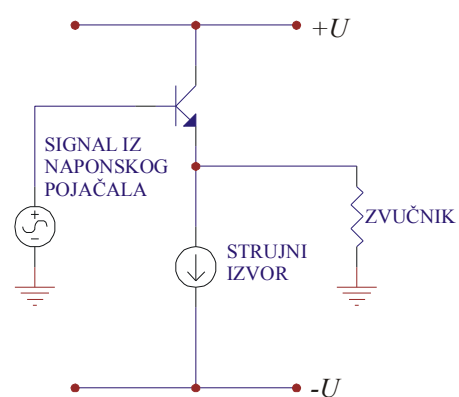
Slike 6.3a do 6.3c prikazuju neke od izvedbi izlaznog stupnja pojačala klase A s različitim teoretskim maksimalnim faktorom iskorištenja.

Danas se najčešće koristi shema dana na slici 6.3c s dva komplementarna tranzistora, u kojoj oba tranzistora vode punu periodu signala. U tom slučaju se postiže maksimalna teoretska korisnost do 50%.

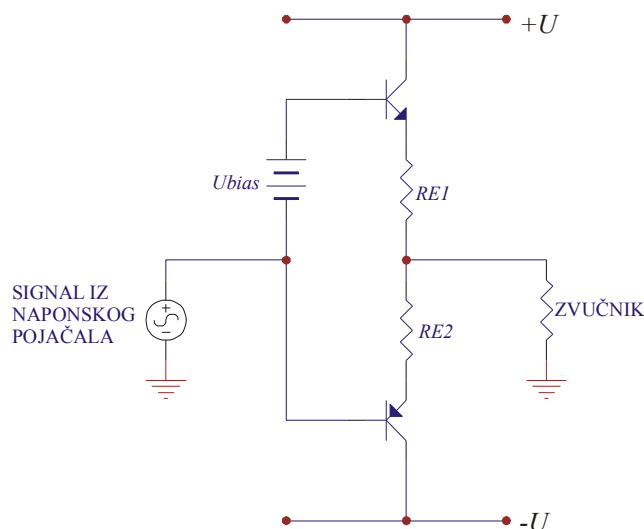
Najveća disipacija je upravo kada nema nikakvog signala, odnosno kada je razina signala jako mala. Najmanja disipacija se postiže kada je izlazni signala maksimalan. Što to znači za konstrukciju pojačala. Na primjer, ako želimo da izlazna snaga pojačala koju predaje zvučniku bude 50 W, onda moramo računati da će se 50W trošiti na zagrijavanje tranzistora, ali samo kada je signal maksimalan. Kada nema signala sva uložena snaga će se trošiti na zagrijavanje tranzistora to znači 100 W. Zbog toga je u pojačalima klase A odvođenje topline veliki problem. Pojačala klase A se mogu prepoznati po velikim hladnjacima. Kako se ova vrsta pojačala najčešće koristi u sustavima visoke kvalitete, tako uporaba ventilatora, koji stvaraju buku, nije prikladna.



Slika 6.3a Korisnost 12,5%



Slika 6.3b Korisnost 25%



Slika 6.3c Korisnost 50%

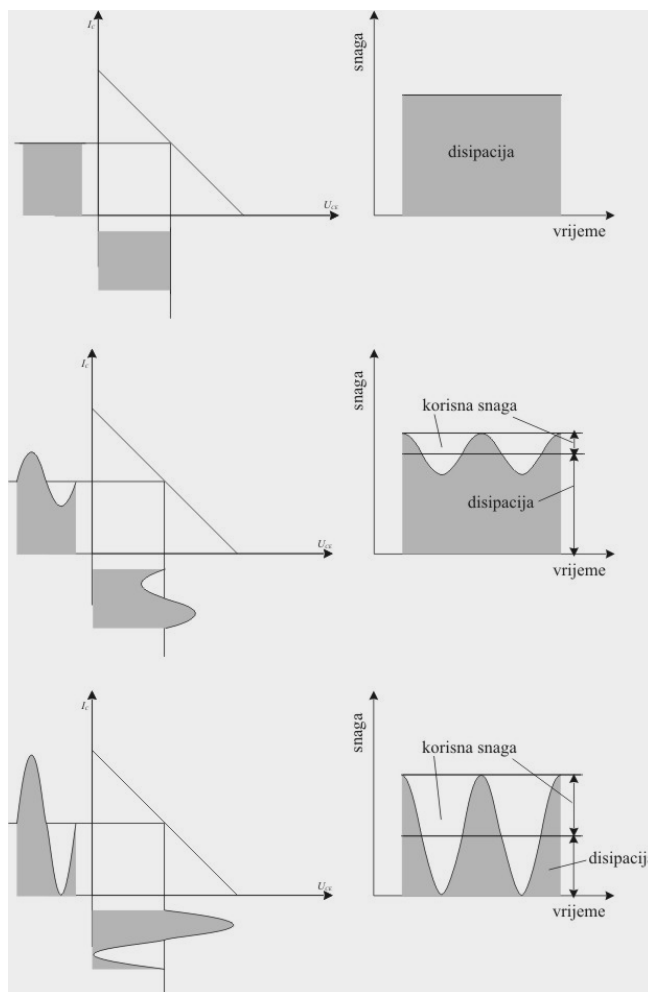
Slika 6.4 prikazuje kako se mijenja disipacija topline u ovisnosti o razini signala na zvučniku.

Uzevši u obzir sliku 6.2 može se izračunati teoretska maksimalna korisnost pojačala klase A. Maksimalna izlazna snaga se može prikazati kao:

$$P_{i\max} = \frac{U/2}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_q}{\sqrt{2}} = \frac{U \cdot I_q}{4}$$

Korisnost se može izračunati kao odnos izlazne i uložene snage:

$$\eta = \frac{P_{i\max}}{P_0} = \frac{\frac{U \cdot I_q}{4}}{U/2 \cdot I_q} = \frac{1}{2} \approx 50\%$$



**Slika 6.4** Disipacija topline u ovisnosti o izlaznom signalu.

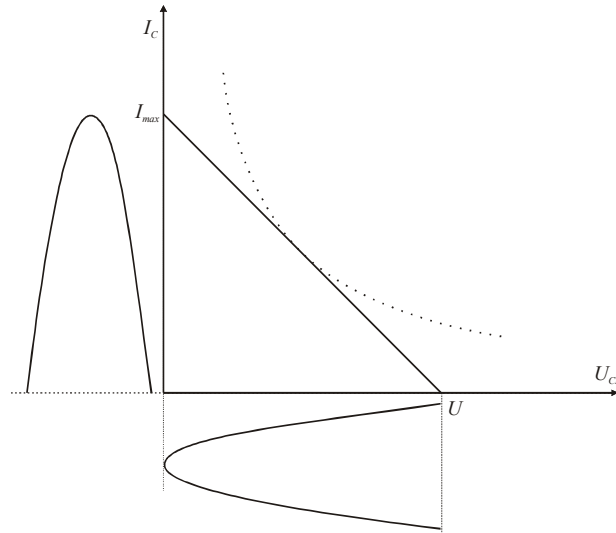
Za proračun toplinskog otpora hladnjaka pojačala potrebno je znati kolika je maksimalna disipacija pojačala, jer se toplinski otpor hladnjaka izračunava za najgori slučaj. Normirana disipacija pojačala klase A se može izvesti iz slike 6.2 i ona iznosi:

$$\frac{P_D}{P_0} = 2 - \frac{P_{izl}}{P_0}$$

Na primjer ako je maksimalna izlazna snaga pojačala klase A  $P_0=100$  W, onda će maksimalna disipacija postojati kada nema nikakvog signala na zvučniku i u tom slučaju će iznositi 200 W.

### 6.3 Klasa B

U izlaznom stupnju pojačala klase B svaki od izlaznih tranzistora iz komplementarnog para vodi samo jednu poluperiodu izlaznog signala. Radna točka je postavljena na početak radnog pravca i prikazana je na slici 6.5.



Slika 6.5 Radni pravac pojačala u klasi B.

Da bi izlazni tranzistori provodili točno jednu poluperiodu izlaznog signala, mora se kompenzirati pad napona na spoju baza-emiter. To znači da se na baze tranzistora mora dovesti mali istosmjerni napon 0,6-0,7 V, koji će radnu točku pomaknuti dalje od koljena u ulaznoj karakteristici tranzistora. U tom slučaju kroz izlazne tranzistore teče mala mirna struja. Teoretska maksimalna korisnost se može izračunati iz dijagrama na slici 6.5.

Na zvučniku se troši snaga:

$$P_{iz} = \frac{U \cdot I}{2}$$

Dovedena snaga se može izračunati iz oblika signala na tranzistorima i ona iznosi:

$$P_{CC} = \frac{2 \cdot U \cdot I}{\pi}$$

Iz toga se korisnost može izračunati kao omjer dobivene i uložene snage:

$$\eta = \frac{P_{iz}}{P_{CC}} = \frac{U \cdot I}{2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot U \cdot I} = \frac{\pi}{4} \approx 0,785 \rightarrow 78,5\%$$

Najveća korisnost je dakle kada se na izlazu nalazi signal najveće amplitude. Najveća disipacija nije kod najveće amplitude ili kod najmanje amplitude izlaznog signala, nego kod normirane izlazne snage od oko 40%. Dakle pojačalo će se najviše grijati kada je izlazni signal oko 63% svoje maksimalne vrijednosti. To je bitan podatak kod proračuna hladnjaka, jer kod proračuna hladnjaka uvijek uzimamo najgoru situaciju, a to je slučaj najviše disipacije. Normirana disipacija pojačala klase B se može prikazati jednačom:

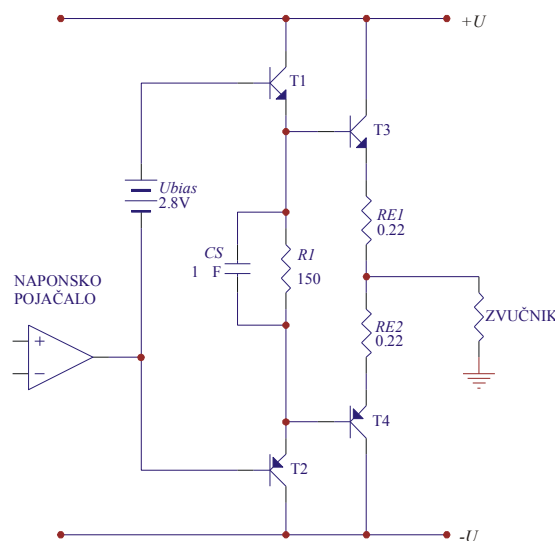


$$\frac{P_D}{P_0} = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{P_{izl}}{P_0} - \frac{P_{izl}}{P_0}}$$

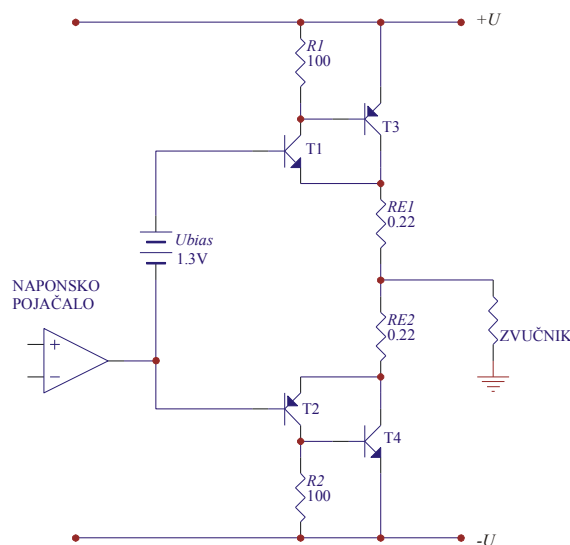
Ova jednakost vrijedi samo ako je točno kompenziran napon između baze i emitera izlaznih tranzistora.

Na primjer, ako je pojačalo klase B konstruirano da zvučniku isporuči snagu od  $P_0=100\text{W}$ , maksimalna disipacija će biti oko 40% te snage, dakle 40W. Kada nema signala na zvučniku, teoretska disipacija će biti nula.

Klasa B se uvijek izvodi s jednim ili više parova komplementarnih tranzistora. Dakle, jedan NPN tranzistor vodi jednu poluperiodu signala, a drugi PNP drugu poluperiodu signala. Najčešće izvedbe takvih izlaznih stupnjeva su emitorsko slijedilo ili komplementarni spoj, prikazani na slikama 6.6a i 6.6b.



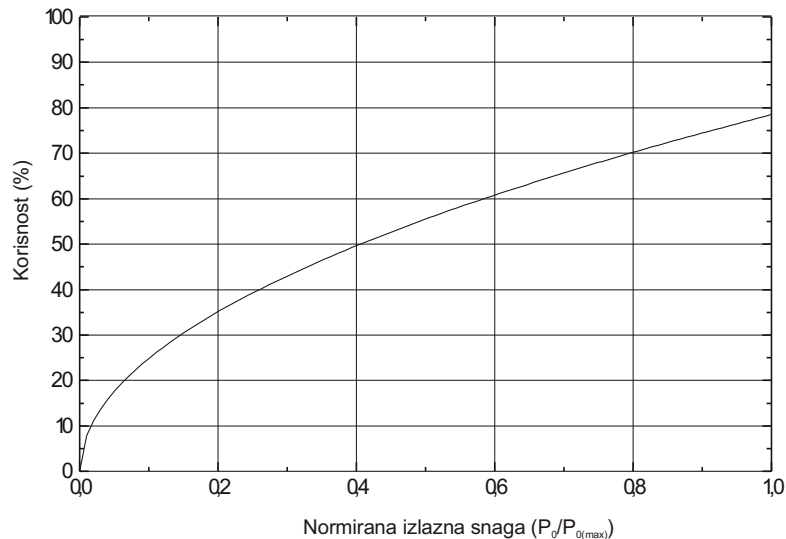
**Slika 6.6a** Klasa B pojačala u spoju emitorskog slijedila.



**Slika 6.6b** Komplementarni spoj.

## 6.4 Klase G i H

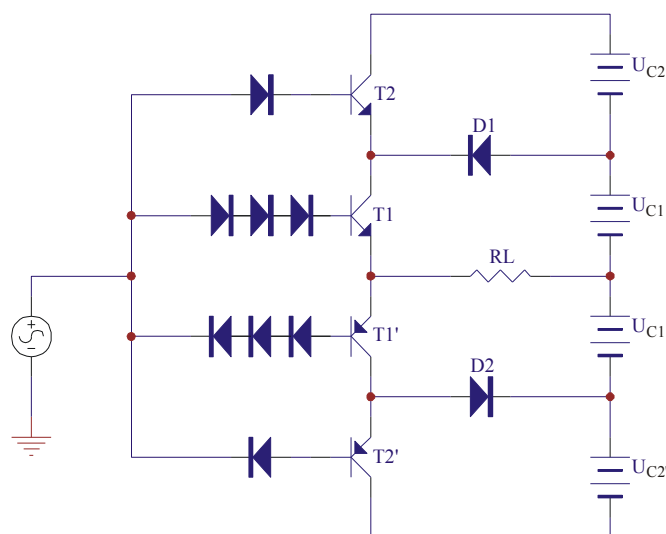
Klase G i H predstavljaju poboljšanje klase B u smislu povećanja iskorištenja. Slika 6.7 prikazuje ovisnost korisnosti klase B o normiranoj izlaznoj snazi. Vidljivo je da korisnost lagano raste s porastom izlazne snage. Pojačala se nikad ne rade s maksimalnom snagom, nego negdje u srednjem području gdje je korisnost puno niža.



**Slika 6.7** Korisnost klase B u ovisnosti o normiranoj izlaznoj snazi.

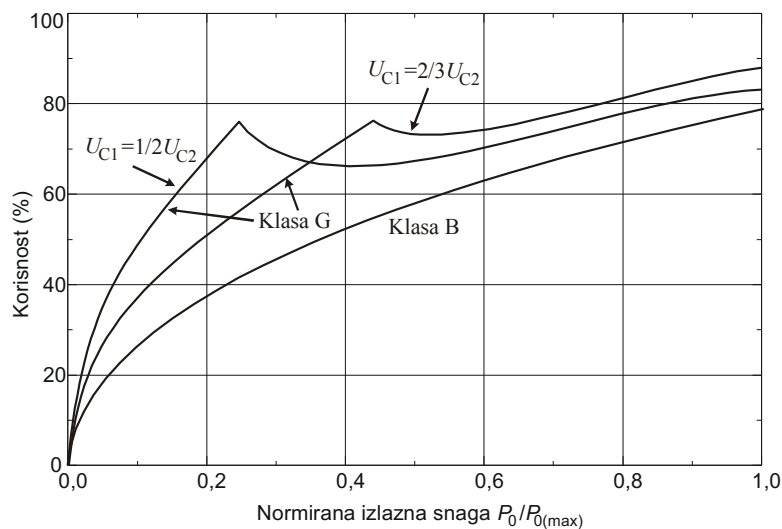
Disipacija topline na tranzistorima je određena s razlikom izlaznog napona i napona napajanja pojačala. Ako pojačalo radi s manjom snagom, da razlika napona će biti veća, a to znači da će i disipacija na tranzistorima biti veća. Dakle, ako zadržimo istu razinu izlaznog signala i smanjimo napon napajanja pojačala, smanjiti ćemo disipaciju na tranzistorima, odnosno povećati korisnost.

Na tom principu rade klase G i H. Kod klase G se koriste dva izvora napajanja, jedan s manjim i jedan s višim naponom. U ovisnosti o razini signala se uključuje jedan ili drugi. To znači kada je potrebna niža izlazna snaga, uključuje se manji izvor napajanja, a kada snaga poraste uključuje se veći izvor napajanja. Na slici 6.8 prikazana je shema rada klase G.



**Slika 6.8** Shema rada klase G.

Klasa H se bazira na jednakom principu, samo je regulacija napona napajanja automatska. To znači da postoji određeni sklop koji namješta napon napajanja prema razini signala. Slika 6.9 prikazuje krivulju korisnosti klase G u usporedbi s klasom B. Vidljivo je povećanje korisnosti na nižim izlaznim snagama. Problem se pojavljuje kod prebacivanja napona napajanja, koje traje neko vrijeme, što se javlja kao mali skok u signalu, što uzrokuje izobličenja. Pojačala klase G i H se najviše primjenjuju u profesionalne svrhe kod ozvučavanja, gdje je korisnost važnija od nešto viših izobličenja.

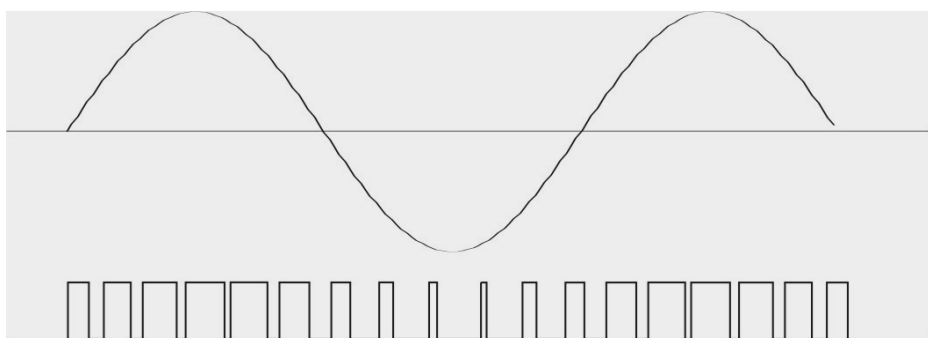


Slika 6.9 Korisnost klase G i H.

## 6.5 Klasa D

Klasa D pojačala je izdvojena od ostalih klasa jer radi na potpuno drugačijem principu. Ovu vrstu pojačala nazivaju u "digitalna" pojačala, zbog samog oblika signala, iako se pod digitalnim pojačalima smatraju sklopovi koji pojačavaju digitalni signal. Pojačala klase D se baziraju na pulsno-širinskoj modulaciji, koja je prikazana na slici 6.10. Trajanje poluperioda pravokutnog signala ovisi o razini analognog nisko-frekvencijskog signala. Na izlazu iz modulatora se nalazi pravokutni signal sa samo dvije razine. Ovaj oblik podsjeća na digitalni zapis signala sa dvije razine pase pojačala prema tome nazivaju "digitalna".

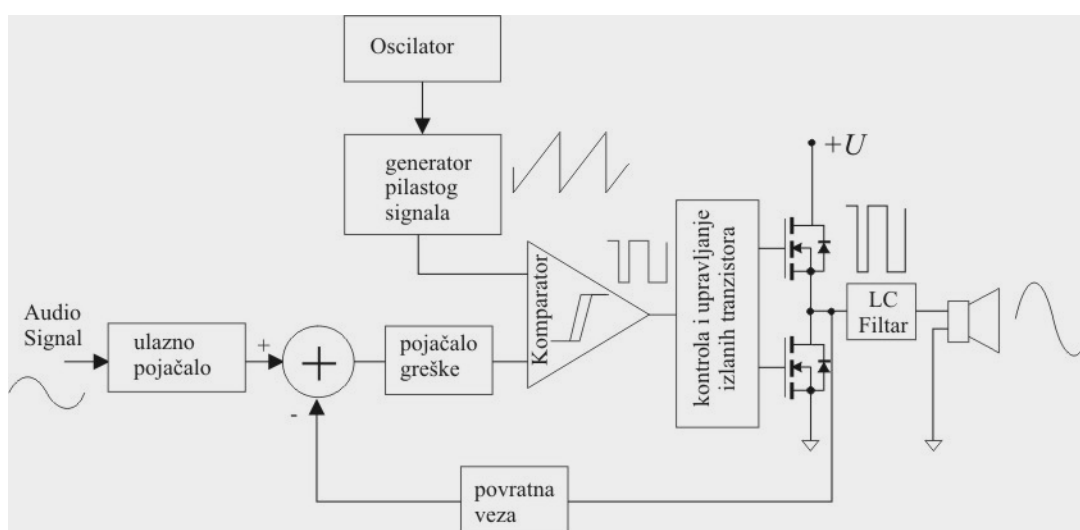
Takav signal se dovodi do izlaznih tranzistora koji su MOSFET-i. Uz takvu pobudu tranzistori prolaze iz stanja zapiranja u stanje zasićenja, koja su predstavljena krajnjim točkama na radnom pravcu tranzistora. To znači da tranzistori potpuno vode, te je na njima pad napona nula, a u drugom trenutku ne vode, te je kroz njih struja nula. Kada se pomnože struje i naponi, ispada da je disipacija na tim tranzistorima, koji rade kao električne sklopke nula. Zbog toga je teoretska iskoristivost ovih pojačala 100%. Međutim, kod realnih tranzistora, taj prelazak iz stanja zapiranja u stanje vođenja se ne događa trenutno, nego to traje neko vrijeme. Zbog toga je realna iskoristivost oko 90% i puno ne ovisi o razini izlaznog signala, što je još uvijek puno više nego kod klase A ili B.



**Slika 6.10** Pulsno-širinska modulacija.

Princip rada pojačala klase D je prikazan na slici 6.11. Takav pojačani pravokutni signal se ne smije dovesti do zvučnika, jer bi zvučnik pregorio. Frekvencija takvog pravokutnog signala se kreće od nekoliko stotina kHz do nekoliko MHz. Spektar takvog moduliranog signala izgleda kao spektar uzorkovanog signala na ulazu u A/D i na izlazu iz D/A pretvarača, odnosno sadrži NF komponentu signala, koja se odnosi na audio signal. Kako bi se dobila pravilna reprodukcija i ne bi uništili zvučnici, na izlazu pojačala klase D se koristi pasivni NF filter.

U početku su se pojačala klase D koristila samo na subwoofere, ali s napretkom tehnologije porasla je i njihova kvaliteta tako da se sve više koriste u profesionalne svrhe za ozvučenja, ali i u auto pojačalima, upravo zbog svoje visoke korisnosti.



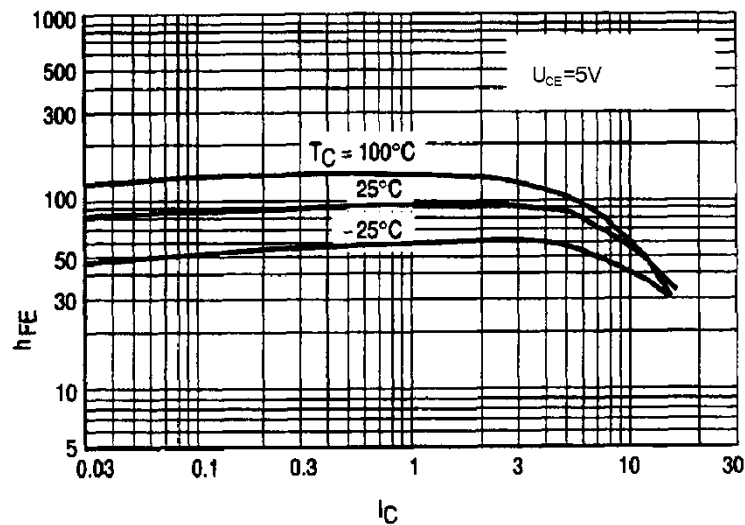
**Slika 6.11** Shema rada pojačala klase D.

## 6.6 Paralelni spoj tranzistora

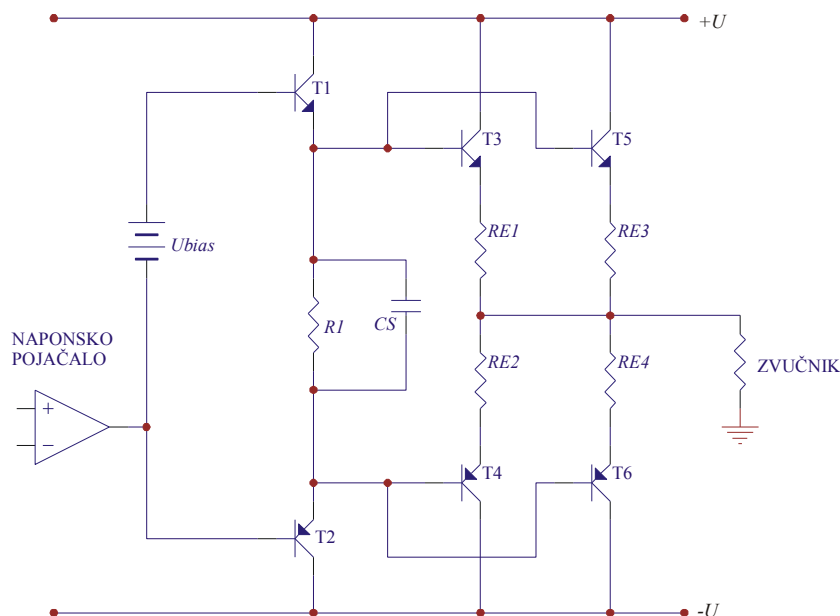
Ako se u klasi A, AB ili B želi povećati snaga, a da se previše ne opterete tranzistori, odnosno zadrži jednaka razina izobličenja, najčešće se koristi paralelni spoj tranzistora. Radna točka tranzistora se uvijek namješta tako da rade u što više linearnom režimu rada. Kako je prikazano na slici 6.12 strujno pojačanje tranzistora ovisi o razini izlazne struje. Vidljivo je linearno područje između 0,1 i 2 A u kojem se pojačanje vrlo malo mijenja sa strujom. Cilj je izlazne tranzistore zadržati u tom području. Zbog toga se koristi spomenuti paralelni spoj u kojem se struja raspodjeljuje na više tranzistora.

Kod paralelnog spoja tranzistora je jako važno da svi tranzistori u tom spoju budu jednako opterećeni. Zbog toga se u seriju s emiterima stavljaju mali otpornici koji služe za

kompenzaciju malih razlika između tranzistora. Slika 6.13 prikazuje paralelni spoj tranzistora. Na primjer, ako struja kroz jedan tranzistor poraste pad povećati će se pad napona na otporniku spojenom na emiter, a time će se smanjiti napon na spoju baza-emiter, što će uzrokovati smanjenje struje kroz taj tranzistor.



Slika 6.12 Strujno pojačanje u ovisnosti o izlaznoj struji tranzistora.



Slika 6.13 Paralelni spoj tranzistora.

## 6.7 MOSFET-i

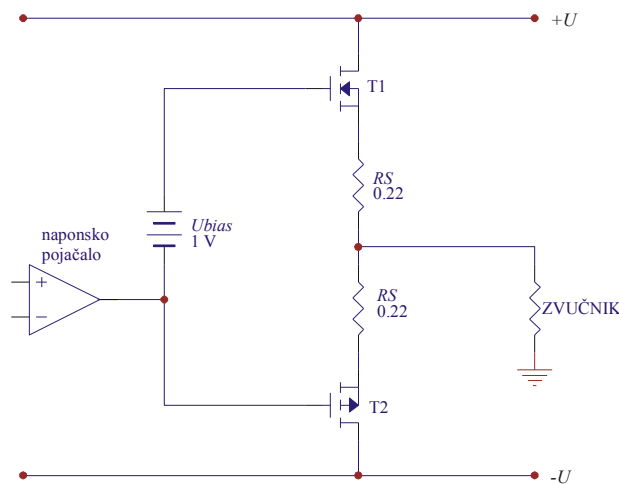
Osim s bipolarnim tranzistorima, pojačala se rade s MOSFET-ima, koji imaju neke prednosti prema ovim prethodnima. MOSFET-i imaju negativni temperaturni koeficijent, što znači da im se s porastom temperature povećava provodni otpor između *draina* i *sourcea* što smanjuje struju kroz tranzistor i sprečava temperaturni bijeg. Zbog toga je ova vrsta tranzistora "otpornija" i robusnija, te pogodna za pojačala većih snaga. Zbog toga

razloga je i paralelni spoj tranzistora jednostavniji, jer se ne moraju spajati dodatni otpori u izlaznom stupnju. Osim toga su imuni na sekundarni proboj i stvaranje "vrućih" točaka.

Radi se o naponski upravljanim tranzistorima, odnosno oni ne trebaju pobudnu struju kao bipolarni tranzistori. Zbog toga su sklopovi pojačala s MOSFET-ima još jednostavniji. MOSFET-i imaju šire frekvencijsko područje rada, tako da bez problema mogu prenositi snagu i na nekoliko stotina kiloherca, odnosno megaherca.

S druge strane traže veću mirnu struju, što povećava disipaciju kada nema signala u pojačalu. Njihova prijenosna karakteristika je manje linearna u odnosu na bipolarne tranzistore. Dosta su osjetljivi na parazitne oscilacije i na elektrostatski izboj.

Slika 6.14 prikazuje izlazni stupanj s MOSFET-ima, koji je puno jednostavniji nego izlazni stupanj s bipolarnim tranzistorima.



Slika 6.14 Izlazni stupanj s MOSFET-ima.

## 6.8 Termalna dinamika pojačala

Kao što je prije navedeno pojačala klase B, a pogotovo klase A imaju malu korisnost, što znači da se dio uložene snage troši na zagrijavanje tranzistora. Da ne bi došlo do uništenja tranzistora zbog prevelikog zagrijavanja, potrebno je koristiti neku vrstu hlađenja, odnosno odvođenja topline. U tu svrhu se koriste razni hladnjaci i ventilatori.

Proračun hladnjaka započinjemo s Ohmovim toplinskim zakonom  $T_j = (P_{Dx} R_{THJA}) + T_A$  koji nam govori da razlika u temperaturi odgovara umnošku disipirane topline i toplinskom otporu medija kroz koji se toplina odvodi. Slika 6.15 prikazuje presjek spoja tranzistora s hladnjakom i ekvivalentnu nadomjesnu shemu.

Kod tranzistora je bitno ne prijeći temperaturu silicijskog spoja, koja se obično navodi u specifikacijama tranzistora. Svaki sloj kroz koji prolazi toplina, u nadomjesnoj shemi je prikazan otporom, odnosno toplinskim otporom (K/W ili °C/W):

$R_{THJC}$  – toplinski otpor između silicijskog spoja i kućišta tranzistora (vezni sloj)

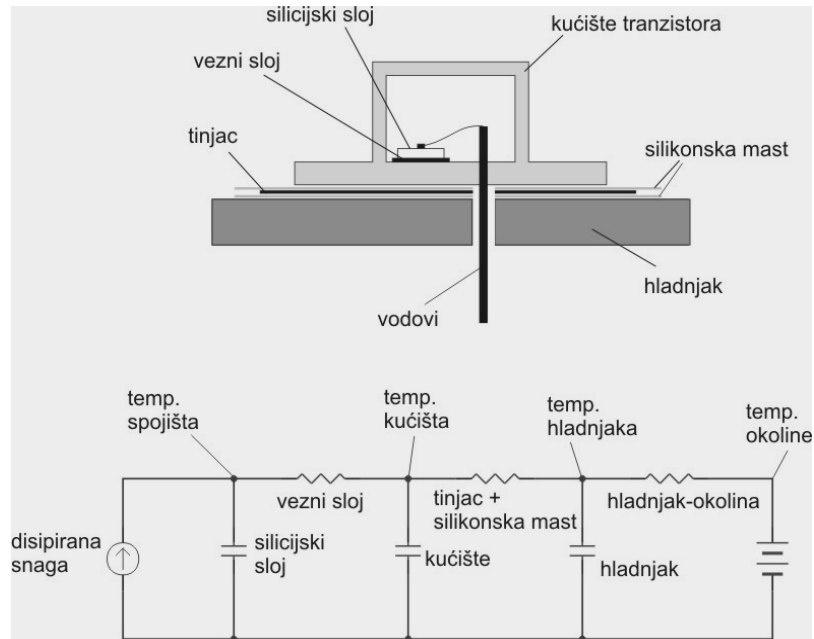
$R_{THCS}$  – toplinski otpor između kućišta tranzistora i električkog izolatora

$R_{THINS}$  – toplinski otpor električkog izolatora tranzistora i hladnjaka (tinjac)

$R_{THSA}$  – toplinski otpor između hladnjaka i okolnog prostora

Ukupni toplinski otpor se onda može napisati kao zbroj svih otpora:

$$R_{THJA} = R_{THJC} + R_{THCS} + R_{THINS} + R_{THSA}$$



**Slika 6.15** Presjek spoja tranzistora i hladnjaka i nadomjesna shema spoja.

Kućište samog tranzistora, ako nije izolirano obično je spojena na kolektor, tako da je u uređajima pod naponom. Hladnjak se obično spaja s kućištem cijelog pojačala, što znači da treba izolirati kućište tranzistora od hladnjaka. U tu svrhu se koriste razni materijali, od tinjca, do silikonske masti. Osim toga ovi materijali pomažu u ispunjavanju malih mikroskopskih udubina na površini kućišta tranzistora i hladnjaka, u koje se može uvući zrak i nepotrebno povećati toplinski otpor spoja.

### Primjer izračuna potrebnog hladnjaka:

Zadana je maksimalna temperatura silicijskog spoja od  $T_J=150\text{ °C}$ . temperatura okoline će u najgorem slučaju narasti do  $T_A=30\text{ °C}$ . Pojačalo radi u klasi B kod koje je izračunato da će disipacija u najgorem slučaju iznositi  $P_D=100\text{ W}$ . Treba izračunati potreban toplinski otpor hladnjaka. Zadani su toplinski otpori  $R_{THJC}=0,6\text{ K/W}$ ,  $R_{THCS}=0,1\text{ K/W}$  i  $R_{THINS}=0,4\text{ K/W}$ .

Prvo treba izračunati ukupni toplinski otpor sustava:

$$R_{THJA} = \frac{T_J - T_A}{P_D} = \frac{150\text{ °C} - 30\text{ °C}}{100\text{ W}} = 1,2\text{ °C/W}$$

Oduzimanjem zadanih toplinskih otpora izračunamo potreban toplinski otpor hladnjaka:  $R_{THSA}=1,2-0,6-0,1-0,4=0,1\text{ K/W}$ .

Pri tome će temperatura hladnjaka biti  $30\text{ °C} + P_D \cdot R_{THSA} = 40\text{ °C}$ .

Kod hladnjaka je uobičajeno da što je veća efektivna površina isijavanja to je toplinski otpor manji, jer je odvođenje topline u tom slučaju bolje. Dakle ako želimo smanjiti dimenzije hladnjaka, moramo mu povećati toplinski otpor.

Ako nema mjesta za smještanje velikog hladnjaka, toplinski otpor hladnjaka se može smanjiti ubacivanjem ventilatora, koji će odvoditi toplinu s hladnjaka. Proračun novog toplinskog otpora hladnjaka je jednostavan. Potrebno je samo znati korekcijski faktor s kojim se množi stari toplinski otpor hladnjaka, a taj faktor ovisi o brzini protoka zraka ventilatora. Tablica 5.1 daje faktor korekcije u ovisnosti o brzini protoka zraka.

Brzina protoka m <sup>3</sup> /h	Faktor korekcije	Brzina protoka m <sup>3</sup> /h	Faktor korekcije
30	0,80	140	0,40
40	0,73	150	0,38
50	0,67	160	0,37
70	0,56	200	0,33
120	0,44		

Dakle, ako u istom pojačalu upotrijebimo ventilator s brzinom protoka zraka od 140 m<sup>3</sup>/h, mogli bi koristiti manji hladnjak s većim toplinskim otporom, ali da postignemo potrebni izračunati toplinski otpor hladnjaka od 0,1 K/W. Toplinski otpor hladnjaka manjih dimenzija će biti:

$$R_{THSAHL} = R_{THSA} / 0,40 = 0,1 / 0,40 = 0,25 \text{ K/W.}$$

## 6.9 Napajanje pojačala

Bitan parametar za kvalitetu i mogućnosti pojačala je napajanje, odnosno izvor istosmjernog napona. Postoji nekoliko vrsta napajanja koja se danas koriste u pojačalima snage.

1. Regulirani izvori napajanja
  - Nema kolebanja signala; signal je jako stabilan
  - Mali šum
  - Relativno mala korisnost, jer su potrebni aktivni sklopovi za regulaciju
  - Slab odziv na tranzijentne signale, jer regulirani izvori napajanja ne mogu trenutno dati veći napon od napona samog izvora
  - Komplicirana izvedba, jer je potreban sklop za regulaciju
2. Neregulirani izvori napajanja
  - Jednostavna izvedba; transformator, ispravljač i kondenzatori
  - Dobar odziv na tranzijentne signale jer transformator može trenutno dati veću struju od one prema kojoj je konstruiran
  - Kolebanje signala; signal nije stabilan i ovisi o vanjskim uvjetima
  - Relativno veliki šum
3. SMPS (switch-mode power supply)
  - U automobilima, kada je iz napajanja od 12V potrebno dobiti na primjer  $\pm 30V$
  - Relativno male dimenzije
  - Malo kolebanje signala
  - Elektromagnetsko zračenje; dolazi od oscilatora koji upravlja transformatorom koji podiže razinu napona
  - Kompleksna izvedba; oscilator, pogonski tranzistori, transformator
  - Slab odziv na tranzijentne signale



## 7. MIKROFONI I ZVUČNICI

### 7.1. Mikrofolni

Mikrofolni su elektroakustički pretvarači koji pretvaraju akustičku energiju u električku. Svi mikrofolni posjeduju neku vrstu membrane ili pokretnu površinu koju pobuđuje zvučni val. Odgovarajući izlaz je električki napon ili struja koji odgovara zvučnom valu.

Mikrofolni se obično svrstavaju u dvije klase: *tlačni* i *brzinski*. Kod tlačnih mikrofolna membrana ima samo jednu površinu izloženu zvučnom valu, tako da izlazni signal odgovara trenutnoj promjeni zvučnog tlaka. Tlačni mikrofon je takozvani gradijentni mikrofon nultog reda i povezuje se sa omnidirekcijskom karakteristikom.

Druga klasa mikrofolna je brzinski mikrofon, koji se također naziva gradijentni mikrofon prvog reda, gdje efekt zvučnog vala razlika gradijenata tlaka ispred i iza membrane mikrofolna. Na taj način električki signal odgovara brzini čestica u zvučnom valu.

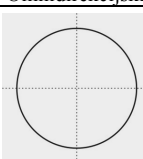
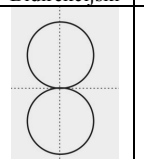
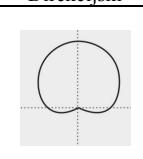
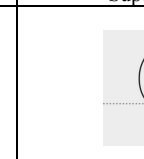
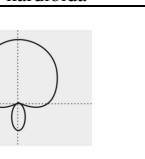
#### 7.1.1 Usmjerna karakteristika

Mikrofolni se također razlikuju prema svojoj usmjernoj karakteristici, tako da postoje:

- Omnidirekcijski – odziv je jednak u svim smjerovima;
- Bidirekcijski – odziv je jednak u dva suprotna smjera (180°) i nula u druga dva suprotna smjera (90°), oblik osmice;
- Unidirekcijski – odziv je različit od nule samo u jednom smjeru, oblik kardioide.

Tablica 7.1 prikazuje usporedbu mikrofolna prema njihovim usmjernim karakteristikama.

**Tablica 7.1** Usmjerne karakteristike mikrofolna

Mikrofon	Omnidirekcijski	Bidirekcijski	Direkcijski	Super-kardioida	Hiper-kardioida
Usmjerna karakteristika					
Izlazni signal	$U = U_0$	$U = U_0 \cos \phi$	$U = \frac{U_0}{2}(1 + \cos \phi)$	$\frac{U_0}{2} [(\sqrt{3} - 1) + (3 - \sqrt{3}) \cos \phi]$	$U = \frac{U_0}{4}(1 + 3 \cos \phi)$
Efikasnost slučajne energije	100	33	33	27	25
Odnos prednjeg/stražnje g odziva	1	1	beskonačno	3,8	2
Kut usmjerenosti (3 dB)		90°	130°	116°	100°
Kut usmjerenosti (6 dB)		120°	180°	156°	140°
Ekvivalentna udaljenost	1	1,7	1,7	1,9	2

### *Omnidirekcijski mikrofoni*

Omnidirekcijska ili sferična usmjerna karakteristika dolazi od činjenice da je membrana izložena zvučnom valu samo s prednje strane. Dakle, nema poništavanja signala zbog toga što zvučni valovi udaraju u prednju i stražnju stranu membrane u istom trenutku.

Omnidirekcijski mikrofoni postaju sve više usmjereni kako se promjer membrane približava valnoj duljini zvučnog vala, stoga bi ovakav mikrofoni trebao imati što manji promjer membrane kako bi se zadržala sferna usmjerna karakteristika na visokim frekvencijama. Ova činjenica proizlazi iz same fizike zvučnog vala, odnosno ogiba vala na rubovima membrane. Promjene se počinju uočavati kada je promjer membrane oko jedne desetine valne duljine zvučnog vala, stoga će frekvencija kod koje počinje povećavanje usmjerenosti biti:

$$f = \frac{c}{10 \cdot D}$$

Gdje su  $c$  brzina zvuka u m/s, a  $D$  promjer membrane u metrima. Na primjer ½ inčni mikrofoni će početi lagano gubiti svoju omnidirekcijsku karakteristiku pri frekvenciji od otprilike 2,5 kHz te će pasti za 3 dB na oko 10 kHz.

Omnidirekcijski mikrofoni obično imaju ravnu frekvencijsku karakteristiku u cijelom audio spektru, jer je samo prednji dio membrane izložen zvučnom valu, što eliminira fazne razlike kao kod unidirekcijskih mikrofona. Što je promjer membrane manji to će odziv biti bolji, ali se s druge strane javlja problem odnosa signal/šum. Što je membrana manja to će i osjetljivost biti manja, što smanjuje maksimalni mogući izlazni signal. Omnidirekcijski mikrofoni također prikazuju vrlo malo efekta blizine.

### *Bidirekcijski mikrofoni*

To su mikrofoni koji imaju jednaki odziv s prednje i stražnje strane, ali vrlo malo sa obje bočne strane. Njihova usmjerna karakteristika odgovara broju osam. Zbog ove karakteristike efikasnost slučajne energije je 33%, što znači da će okolni šum biti 67% niži nego kod omnidirekcijskog mikrofona.

Ova karakteristika je ekstremno korisna kod snimanja dva nasuprotna govornika, jer ovi mikrofoni hvataju vrlo malo zvučnog signala koji dolazi sa strane. Zbog veće usmjerenosti ekvivalentna udaljenost je 1,7.

Kao i kod omnidirekcijskog mikrofona, usmjerenost ovisi o frekvenciji, odnosno što je frekvencija viša to je usmjerenost veća.

### *Unidirekcijski mikrofoni*

Ovi mikrofoni su osjetljiviji na zvučni val koji dolazi s prednje strane nego iz bilo kojeg drugog smjera. Unidirekcijski mikrofoni se obično nazivaju kardioidni ili direktni, super-kardioidni ili hiper-kardioidni. Naziv kardioidni dolazi iz oblika usmjerne karakteristike koja ima oblik srca. Ova vrsta mikrofona je najviše korištena vrsta za odzvučavanje, jer dobro odvajaju signal i okolni šum ili buku. To ima nekoliko prednosti:

1. Manje okolne buke;
2. Više pojačanja prije pojave povratne veze, pogotovo kada se nalaze u direktnom polju;
3. Odvajanje zvučnih izvora.

Kardiodna karakteristika se može dobiti na jedan od dva načina:

1. Prva metoda kombinira izlazni signal tlačne membrane i tlačne-gradijentne membrane. Kako tlačna-gradijentna membrana ima bidirekcijsku usmjernu karakteristiku, a tlačna membrana ima omnidirekcijsku karakteristiku, valovi koji dolaze s prednje strane se zbrajaju, a valovi koji dolaze sa stražnje strane se odbijaju zbog fazne razlike od  $180^\circ$  između ove dvije vrste membrana. Ova metoda je skuplja i rjeđe se koristi za ozvučavanje kod mikrofona opće namjene.
2. Druga i češće korištena metoda je uporaba jedne membrane i akustičkog kašnjenja za signale koji dolaze do stražnje strane membrane. Kada zvučni val dođe do prednje strane membrane, prvo udari u nju, a nakon toga u stražnju stranu, ali nakon određenog zakašnjenja. Ako je fazni kut signala na prednjoj strani  $0^\circ$ , tada će fazni kut signala na stražnjoj strani biti između  $0^\circ$  i  $180^\circ$ . Ako je fazni kut stražnjeg signala  $0^\circ$ , nema razlike u tlakovima i membrana se ne pomiče, odnosno izlazni signal je nula. S druge strane ako je fazni kut stražnjeg signala  $180^\circ$ , dolazi do udvostručenja signala.

Fazna razlika je uzrok dodatnog puta koji signal mora prijeći da bi došao do stražnje strane membrane. Kada signal dolazi sa stražnje strane mikrofona, on dolazi do prednje i stražnje strane u istom trenutku ali s istim polaritetom što poništava signal.

Frekvencijski odziv kardiodnih mikrofona nije tako ravan kao kod omnidirekcijskih mikrofona, zbog toga akustičkog zakašnjenja koje ovisi o frekvenciji, te akustičkog otpora tog kašnjenja. Iako je prednja frekvencijska karakteristika dosta ravna, stražnja se obično povećava na niskim i visokim frekvencijama.

### 7.1.2 Efekt blizine (*proximity effect*)

Kako se izvor zvuka približava mikrofону, odziv na niskim frekvencijama se povećava zbog efekta blizine. Do efekta blizine dolazi zbog činjenice da kada se izvor jako približi mikrofону, zvučni tlak s prednje strane membrane je puno veći nego sa stražnje strane, tako da se razlika signala povećava.

Ovaj efekt ima svoje prednosti i nedostatke. Koristan je kada pjevač želi povećati razinu niskih tonova u glasu ili kada svirač želi povećati odziv niskih frekvencija svog instrumenta. To se može vrlo lako regulirati promjenom udaljenosti izvora zvuka od mikrofona.

### 7.1.3 Frekvencijska karakteristika

Poznavanje frekvencijske karakteristike unidirekcijskih mikrofona je vrlo važan faktor, i to ne samo u smislu razine signala na pojedinim frekvencijama, nego i načina na koji će se mikrofون koristiti. Ako se frekvencijska karakteristika mikrofona ocjenjuje samo s prednje strane pod kutom od  $0^\circ$ , vjerojatno će se previdjeti efekt blizine i odziv pri nekom drugom kutu. Usporedba frekvencijskog odziva mikrofona s udaljenosti od izvora će pokazati da većina mikrofona ima efekt blizine.

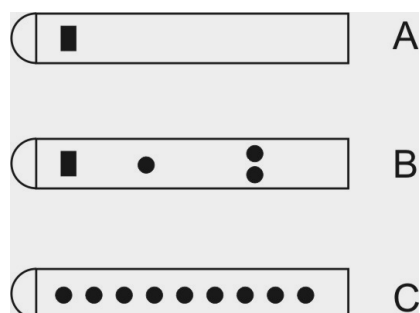
Kada se unidirekcijski mikrofون koristi na stalku, odnosno ako miruje, treba uzeti u obzir činjenicu da će se izvođač obično micati lijevo i desno od mikrofona. Stoga je vrlo važno poznavati odziv mikrofona s kutom prema izvoru zvuka. Polarni dijagrami usmjerne karakteristike su s jedne strane ograničeni jer daju odzive samo na određenim frekvencijama, tako da je bolje prikazati cijele frekvencijske karakteristike u ovisnosti o

kutu dolaska zvučnog vala. To je najbolje raditi sa ružičastim šumom jer će se istovremeno vidjeti problemi na svim frekvencijama.

Također, prilikom mjerenja u gluhoj komori, važno je znati činjenicu da ljudska glava dosta utječe na odziv mikrofona na višim frekvencijama. Kada se glava približi mikrofona, ona djeluje kao reflektor, tako da unidirekcijski mikrofona može na određenim udaljenostima glave "vidjeti" reflektirani signal izvora koji želi izbjeći.

#### 7.1.4 Vrste kardioidnih mikrofona

Kardioidni mikrofona se razlikuju po tome kao signal dolazi do stražnje strane membrane. Zvuk obično ulazi u stražnji dio mikrofona kroz jedan ili više otvora, kako je prikazano na slici 7.1.



**Slika 7.1** A – Kardioidni mikrofona s jednim ulazom; B – Kardioidni mikrofona sa tri ulaza; C – kardioidni mikrofona sa više ulaza

Svi mikrofona s jednim ulazom imaju postavljen otvor na jednoj udaljenosti od stražnje strane membrane. Otvor je obično postavljen unutar  $1\frac{1}{2}$  in (3,8 cm) do membrane i može uzrokovati snažan efekt blizine.

Variranjem udaljenosti otvora od membrane se može utjecati na frekvencijski odziv i usmjernu karakteristiku mikrofona. Također, oblik šupljine iza stražnje strane membrane može utjecati na odziv mikrofona. Proizvođači koriste razne kombinacije kako bi postigli optimalni odziv, ali još uvijek nema mikrofona koji bi zadovoljio sve potrebe pjevača ili svirača.

Neki proizvođači su posegnuli za dvosmjernim kardioidnim mikrofona, koji imaju odvojene krugove za niske i visoke frekvencije. Dva sustava su odvojena skretnicama, kao i kod zvučnika.

#### 7.1.2 Vrste pretvarača

##### *Ugljeni mikrofona*

Jedna od prvih vrsta mikrofona su bili ugljeni mikrofona, koji se i danas koriste u nekim telefonima. Ova vrsta mikrofona ima ograničen frekvencijski odziv, proizvodi dosta šuma i zahtjeva izvor napajanja.

Ovaj mikrofona radi na principu promjene otpora. Nekoliko stotina malih granula ugljika se drže skupa u mjedenoj posudi koja je spojena na metalnu membranu. Zvučni valovi koji udaraju u membranu pomiču granule, mijenjajući kontaktni otpor između granula, a time i ukupni otpor. U seriju s tim otporom je spojen izvor istosmjernog napona i primar audio transformatora. Promjena otpora uzrokuje promjenu struje u ritmu zvučnog vala.

### Kristalni i keramički mikrofoni

Ovi mikrofoni su nekada bili jako popularni jer su bili jeftini, te su njihova visoka impedancija i visoki izlazni signal omogućavali da se direktno spoje na cijevno pojačalo.

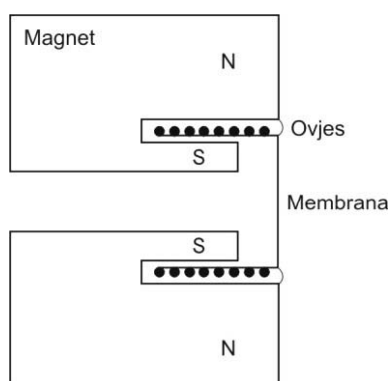
Kristalni i keramički mikrofoni rade na principu piezoelektričkog efekta. Neki kristali, nakon obrade, imaju svojstvo da mehaničkim pritiskom generiraju električki napon između svojih površina. Ako se membrana spoji s takvim kristalom, njeno pomicanje će generirati promjenu tog napona, koji odgovara zvučnom valu. Ovi mikrofoni imaju frekvencijski odziv od 80 Hz do 6,5 kHz, ali se mogu napraviti da imaju ravan odziv sve do 16 kHz. Njihova izlazna impedancija je oko 100 k $\Omega$ , te zahtijevaju predpojačalo s ulaznim otporom od 1 M $\Omega$  do 5 M $\Omega$ .

### Dinamički mikrofoni

Dinamički mikrofoni se uvelike koriste u audio industriji i audiotehnici. Njihova robusnost i pouzdanost čine ih idealnim i prikladnim za uporabu na koncertima, odnosno izvedbama u živo. Njihova frekvencijska karakteristika se kreće od 100 Hz do 10 kHz, što ih čini idealnim za snimanje vokala.

Princip rada dinamičkih mikrofona se osniva na gibanju vodiča u magnetskom polju. Na tanku i laganu membranu zalijepljena je zavojnica koja se nalazi u polju permanentnog magneta. Kada promjena zvučnog tlaka uzrokuje pomicanje membrane, to uzrokuje pomicanje zavojnice u kojoj se zbog magnetskog polja u kojem se nalazi inducira struja koja je proporcionalna brzini titranja membrane.

Impedancija dinamičkih mikrofona se najčešće kreće oko 200 ohma. To je dovoljno visoko za induciranje struje u primaru izlaznih transformatora, a dovoljno nisko za spajanje mikrofona na dugačke mikrofonске kabele. Slika 7.2 prikazuje princip rada dinamičkog mikrofona.



**Slika 7.2** Princip rada dinamičkog mikrofona.

### Trakasti mikrofoni

Trakasti (*ribbon*) mikrofoni imaju jako ravnu frekvencijsku karakteristiku sve do 15 kHz. Međutim, njihova krhka izvedba čini ih pogodnima samo za studijske primjene.

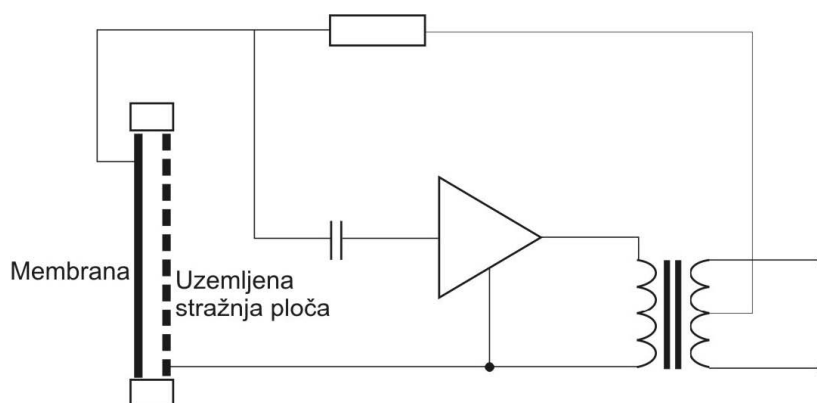
Princip rada se bazira na dugoj, tankoj vodljivoj traci koja se nalazi u magnetskom polju. Pomicanje trake u magnetskom polju će uzrokovati induciranje električke struje u njoj. Veličina te struje je jako niska, tako da se na izlazu koristi audio transformator. Izlazna impedancija je oko 200 ohma.

### Kondenzatorski i elektretske mikrofoni

Ako se traži visoka osjetljivost i dobar odziv na visokim frekvencijama, obično se koristi kondenzatorski mikrofoni.

Kondenzatorski mikrofoni rade na principu promjene kapaciteta. Sastoji se od dvije tanke vodljive membrane, od kojih je jedna pokretna. Kako bi kondenzatorski mikrofoni radio potrebno ga je prethodno nabiti određenim električkim poljem. Zbog toga je potrebno imati napajanje mikrofona, koje se zove 'fantomsko' napajanje, a najčešće iznosi 48V.

Fantomsko napajanje se na ploče kondenzatora dovodi preko otpora visoke vrijednosti, a blokirajućim kondenzatorom se sprječava da istosmjerna struja uđe u pretpojačalo. Pomicanje membrane uzrokuje promjenu kapaciteta kondenzatora, a time i napona na njemu. Veliki otpor sprečava brzo pražnjenje kondenzatora, odnosno pražnjenje je puno sporije od frekvencija audio signala. Ta promjena napona se dovodi u pretpojačalo visokog ulaznog otpora, gdje se pojačava na prikladnu razinu. Slika 7.3 prikazuje princip rada kondenzatorskog mikrofona.



Slika 7.3 Shema kondenzatorskog mikrofona.

Elektretske mikrofoni rade na sličnom principu, samo se koriste unaprijed naelektrizirani materijali, tako da nema potrebe za vanjskim napajanjem. Najveća prednost elektretskih mikrofona je u njihovim kompaktnim dimenzijama, tako da se često koriste kao mikrofoni na odjeći.

#### 7.1.6 Specijalne vrste mikrofona

##### *Riffle mikrofoni*

*Riffle* (puška) mikrofoni se tako naziva zbog svog oblika. Sastoji se od dugačke jedne ili više dugačkih cijevi koje slične na cijev puške. Osnovnu konstrukciju čini mikrofoni s kardoidnom karakteristikom na koji je spojena dugačka cijev, uzduž koje su raspoređeni otvori. Otvori su tako raspoređeni da omogućuju poništavanje zvuka koji dolazi sa strane. Na taj način, zvukovi koji dolaze sa strane su više prigušeni, nego zvukovi koji dolaze srijeda. Ova vrsta mikrofona ima usmjernu karakteristiku, koja je jako usmjerena prema naprijed. Zbog toga se koriste u situacijama kada treba izolirati određeni izvor zvuka, na primjer prilikom intervjua u jako bučnim prostorima, na sportskim natjecanjima, snimanjima životinja i slično. Radi smanjenja šuma ovi mikrofoni se oblače u štitnik od vjetra.



Slika 7.4 *Riffle* mikrofoni.

### *Parabolični mikrofoni*

Alternativa *riffle* mikrofoni je parabolični mikrofoni, koji svoju visoku usmjerenost postiže uz pomoć paraboličnog tanjura, odnosno površine. Tanjur obično ima promjer između 0,5 i 1 metra i mikrofoni je postavljen u fokus parabole. Ukupni dobitak na visokim frekvencijama je oko 15 dB u jednom smjeru. Na niskim frekvencijama, gdje valna duljina postane usporediva s dimenzijama tanjura, dobitak se smanjuje. Kako ovaj mikrofoni koncentrira zvučne valove iz jednog smjera, za razliku od *riffle* mikrofona koji prigušuje one sa strane, postižu se dosta visoke razine signala. Međutim, dosta je nespretni za uporabu i u nekim situacijama generira dosta tonski obojen zvuk.



Slika 7.5 Parabolični mikrofoni

### *Granični ili "pressure-zone" mikrofoni*

Ova vrsta mikrofona se u osnovi sastoji od omnidirekcijskog mikrofona koji je postavljen na kvadratičnu ili okruglu ploču. Kapsula mikrofona je okrenuta prema ploči na udaljenosti od 2 do 3 mm od nje. Usmjerna karakteristika ovog mikrofona izgleda kao polu-kugla. Najčešće se postavljaju na velike, ravne površine, kao što su zidovi ili podovi, ili na primjer s unutrašnje strane poklopca klavira.

### *Stereo mikrofoni*

Kako samo ime kaže stereo mikrofoni služe za snimanje stereo signala. U osnovi, stereo mikrofoni se sastoji od dva mikrofona u jednom kućištu, uz mogućnost namještanja kuta između njih. Također, svakoj kapsuli se može mijenjati usmjerna karakteristika.

Dakle, u jednom slučaju možemo mikrofona tako namjestiti da obje kapsule imaju bidirekcijsku usmjernu karakteristiku, na primjer pod kutom od  $90^\circ$ , ili par kardioda pod kutom od  $120^\circ$ .

### XY stereo tehnika

Ova tehnika koristi dva mikrofona s jednakom usmjernom karakteristikom pod određenim kutom. Jedna kapsula direktno šalje signal u lijevi kanal, a druga u desni kanal. Stereofonske karakteristike ovise o usmjernoj karakteristici mikrofona i kutu između njihovih osi. Slika 7.6 prikazuje usmjerne karakteristike kod XY stereo tehnike.

### MS stereo tehnika

Kod ove izvedbe koriste se dvije kapsule. Jedna srednja (*mid* – M) kapsula direktno snima "zbroj" signala, bočna (*side* – S) kapsula "razliku" signala sa strane. Slika 7.6 prikazuje usmjerne karakteristike MS tehnike snimanja. Za M kapsulu se najčešće koristi kardiodna usmjerna karakteristika okrenuta prema naprijed, dok se za S kapsulu koristi bidirekcijska usmjerna na stranu. Iz toga proizlaze jednadžbe za M i S signale.

$$M=(L+D)/2$$

$$S=(L-D)/2$$

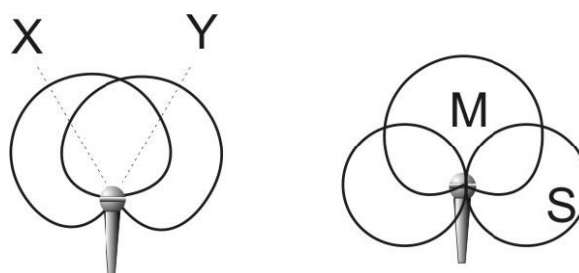
Za lijevi i desni kanal onda proizlazi.

$$L=(M+S)/2$$

$$D=(M-S)/2$$

Lijevi i desni kanal se mogu dobiti uporabom transformatora ili aktivnim krugovima.

Kada se usporede ove dvije tehnike stereo snimanja, MS tehnika daje bolje rezultate, pogotovo što se tiče dobivanja mono signala.



Slika 7.6 XY i MS stereo tehnike

### 7.1.7 Osjetljivost i šum mikrofona

Mikrofoni se razlikuju po svojoj osjetljivosti. Osjetljivost mikrofona predstavlja odnos između dobivene razine električkog signala na izlazu mikrofona i razine zvučnog tlaka ispred mikrofona. Osjetljivost se obično daje u mV/Pa. Razina od  $20 \mu\text{Pa}$  predstavlja prag čujnosti ljudskog uha i to je referenca za mjerenje zvučnog tlaka u dB. Najmanje osjetljivi mikrofoni su trakasti mikrofoni s osjetljivosti između 1 do 2 mV/Pa, a najosjetljiviji su kondenzatorski mikrofoni s osjetljivosti oko desetak mV/Pa



Svi mikrofoni generiraju šum. Ne samo zbog aktivnih elemenata, koji se na primjer ugrađuju u kondenzatorske mikrofone, nego i zbog samog toplinskog šuma. Otpor zavojnice od 200 ohma će između 20 Hz i 20 kHz generirati toplinski šum razine 0,26  $\mu\text{V}$ . Razina šuma se obično mjeri u decibelima po A karakteristici. Tipična vrijednost šuma može biti 18 dBA, što je ekvivalentno buci koju mikروفon prima. Odnos između razine električkog signala za normiranu razinu zvučnog tlaka i razine šuma predstavlja odnos signal-šum mikrofona. Na primjer, dinamički mikروفon ima osjetljivost od 2 mV pri 94 dB SPL. Razina šuma je oko 0,26  $\mu\text{V}$ . Odnos između ove dvije razine će dati odnos signal-šum od 77 dB.

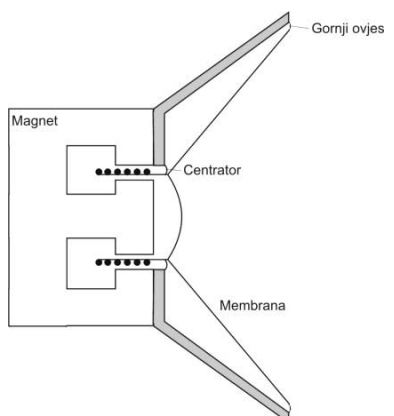
## 7.2 Zvučnici

Zvučnik je pretvarač koji pretvara električku energiju u akustičku. Najčešće se sastoji od membrane koja se pomiče uz pomoć električke pobude te proizvodi zvučne valove. Zvučnik je zadnji dio elektroakustičkog lanca i kada se uspoređi s ostalim dijelovima tog lanca radi se o najslabijoj karici. Kvalitetna reprodukcija visoko-vjernog (*high-fidelity*) zvuka predstavlja veliki problem. Kvaliteta samih pretvarača se zadnjih desetljeća jako povećala, zahvaljujući novim materijalima i konstrukcijama. Veliki ulogu u reprodukciji zvuka igraju zvučničke kutije. Konstrukcija, vrsta i materijali zvučničkih kutija mogu značajno utjecati na kvalitetu reprodukcije.

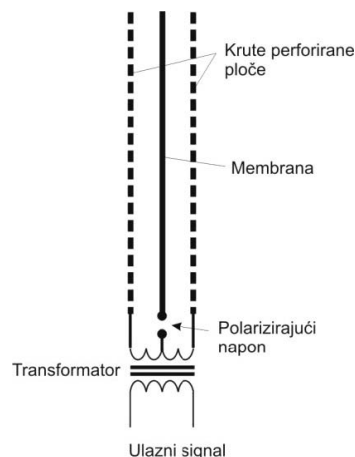
### 7.2.1 Vrste zvučničkih jedinica

#### *Dinamički zvučnik*

Ova vrsta zvučnika se danas najviše koristi, zbog svojih konstrukcijskih karakteristika, brzine implementacije, izvedbe, te kvalitete reprodukcije. Slika 7.7 prikazuje shemu elektrodinamičkog zvučnika. Ako se ona uspoređi sa shemom dinamičkog zvučnika može se vidjeti na nema velikih razlika u konstrukciji. Na zavojnicu koja se nalazi u polju permanentnog magneta je nalijepljena membrana, koja je preko donjeg i gornjeg ovjesa ovješena na okvir. Električka struja, koja teče kroz zavojnicu i magnetsko polje će uzrokovati kretanje zavojnice, a time i membrane. Membrana "tlači" zrak ispred i iza, te na taj način uzrokuje promjenu okolnog atmosferskog tlaka. Ako je frekvencija te promjene u području slušne plohe ljudskog uha, onda će zvučnih proizvesti zvučni val.



**Slika 7.7** Shema dinamičkog zvučnika



**Slika 7.8** Shema elektrostatskog zvučnika

### *Elektrostatski zvučnik*

Slično kao i kondenzatorski mikrofoni, elektrostatski zvučnik radi na principu elektrostatskog privlačenja membrana. Ova vrsta zvučnika se sastoji od velike, ravne, jako lagane membrane koja je postavljena između dvije krute, perforirane ploče. Slika 8.8 prikazuje shemu takvog zvučnika. Kako bi zvučnik mogao raditi kao promjenjivi kondenzator, potrebno je središnju membranu električki nabiti uz pomoć istosmjernog napona visoke razine (reda kV). Izmjenični napon, koji odgovara audio signalu, dovodi se na dvije druge krute ploče te se time modulira elektrostatsko polje. Na taj način se proizvodi mehanička sila kojom se središnja membrana giba i time proizvodi zvučni val.

Ne postoji kutija u koju se stavlja ovaj zvučnik, nego zvuk izlazi kroz otvore na krutim pločama. Dakle zvuk se jednako emitira s obje strane zvučnika, odnosno njegova usmjerna karakteristika ima oblik broja osam.

Nedostatak elektrostatskih zvučnika je slab odziv na niskim frekvencijama, te potreba za posebnim krugovima za napajanje.

### *Piezoelektrički zvučnici*

Ova vrsta zvučnika koristi piezoelektrički efekt za reproduciranje zvučnog vala. Dakle, kada se na piezoelektrički materijal dovede električki napon on će se skupiti ili širiti, ovisno o polaritetu tog napona. Dovođenjem izmjeničnog napona, materijal će se širiti i skupljati u ritmu određene frekvencije.

Kako su dimenzije ovih materijala male, ova vrsta zvučnika se najčešće koristi za generiranje zvučnih valova visokih frekvencija.

## **7.2.2 Zvučničke kutije**

Dinamički zvučnik emitira zvučne valove sprijeda i straga membrane. Razina tih valova je jednaka, ali im je razlika u fazi  $180^\circ$ . Dakle, kako se zvuk širi oko zvučnika, u određenim točkama i na određenim frekvencijama doći će do poništavanja zvučnog vala. To se može riješiti tako da se zvučnik ugradi u takozvanu beskonačnu ploču, kojom će se spriječiti da stražnji val dođe sprijeda i obrnuto. Kako to nije praktički moguće izvesti, zvučnici se ugrađuju u kutije, koje onda "glume" beskonačnu ploču.

### *Zatvorene kutije*

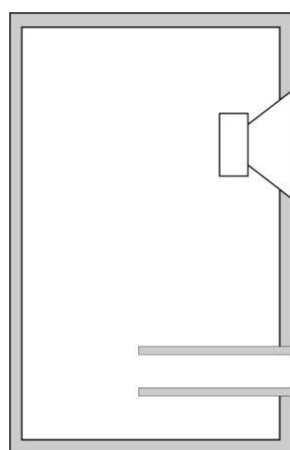
Kako samo ime kaže zatvorena kutija je kutija koja ima samo jedan ili više otvora u koji se postavljaju zvučničke jedinice. Zatvorena kutija, kao i sve ostale kutije, predstavljaju dodatni akustički sustav, te na taj način utječu na reprodukciju zvuka. Zvučni val sa stražnje strane se emitira u kutiju. Kako je kutija zatvorena dolazi do tlačenja zraka u kutiji, što predstavlja dodatni otpor titranju, odnosno kutija na neki način prigušuje titranje zvučnika. To stlačivanje zraka predstavlja dodatnu krutost titrajnog sustava, te se mora pribrojiti krutosti same zvučničke jedinice. Na kojoj frekvenciji će doći do najvećeg prigušivanja, odnosno s druge strane izdizanja amplitude titranja, ovisi o volumenu kutije i vrsti materijala koji se stavlja u nju. Ta frekvencija se naziva rezonantna frekvencija kutije.

### *Bas-refleks kutije*

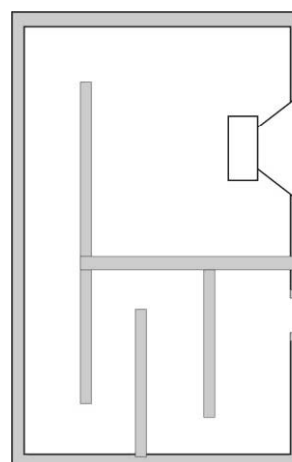
Ova vrsta kutije osim otvora za zvučničke jedinice na sebi ima i dodatne otvore, kojima se može ugoditi rezonantna frekvencija kutije, odnosno cijelog sustava. Dimenzije otvora, volumen kutije i parametri jedinica definiraju rezonantnu frekvenciju. Ovakva izvedba predstavlja dodatni akustički rezonatorski krug, tako da se na određenim frekvencijama događa emitiranje zvučnih valova iz samog otvora. Dakle, karakteristike emitiranja zvučnih valova otvora i zvučnika se zbrajaju čime se postiže veća efikasnost i proširenje frekvencijskog područja prema nižim frekvencijama. Slika 8.9 prikazuje shemu bas-refleks kutije.

### *Transmisije*

Druga vrsta otvorenih kutija je transmisija, odnosno transmisijski zvučnik. U ovom slučaju u kutiju je ugrađen labirint, koji predstavlja dugu akustičku prijenosnu liniju. Efektivna dužina te linije određuje rezonantnu frekvenciju kutije, odnosno sustava. Ako se labirint ispuni apsorpcijskim materijalom, na određenim frekvencijama će doći do postepenog prigušenja zvučnog vala emitiranog sa stražnje strane zvučnika, dok će na određenoj frekvenciji doći do rezoniranja zraka u labirintu. Prednost ovog sustava je mogućnost proširenja odziva na jako niske frekvencije. Slika 8.10 prikazuje shemu transmisijke kutije.



**Slika 7.9** Shema bas-refleks kutije



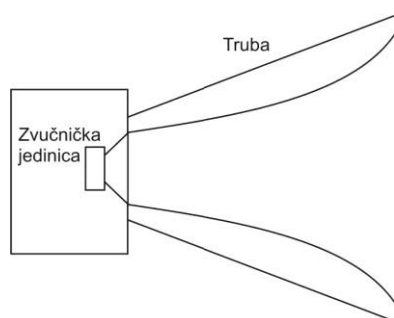
**Slika 7.10** Shema transmisijke kutije

### *Zvučnici s trubom*

Najveći problem zvučnika je njihov niski koeficijent iskorištenja. Niski koeficijent iskorištenja dolazi zbog velike razlike između akustičkog otpora zraka i električkog otpora zavojnice, tako da se veliki dio električke energije troši na zagrijavanje zavojnice.

Akustički otpor zraka se može povećati boljim prilagođenjem, na primjer uporabom trube posebnog oblika. Slika 8.11 prikazuje shematski prikaz zvučnika s trubom. Truba predstavlja akustički pretvarač, koji "podize" akustički otpor zraka i približava ga električkom otporu zavojnice. Na taj način se može postići i do 10 dB veći zvučni tlak za jednaku električku snagu. Djelovanje trube je ograničeno na relativno usko frekvencijsko područje, te njene dimenzije određuje valna duljina središnje frekvencije koju zvučnik emitira. Tako visokotonski zvučnici imaju male trube, a srednjetonski, odnosno niskotonski zvučnici veće. Zbog toga se trube češće za visoke frekvencije nego za niske,

upravo zbog praktičnih razloga. Zvučnici s trubom imaju veću usmjerenost tako da su prikladni za uporabu u nekim slučajevima ozvučenja, kada treba ozvučiti točno određeni dio prostora.



Slika 7.11 Zvučnik s trubom

### 7.2.3 Zvučnički sustavi

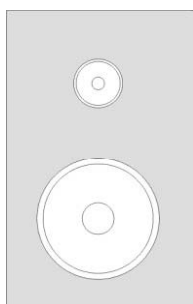
#### *Višesistemski zvučnici*

Frekvencijsko područje rada zvučnika ovisi o nekoliko značajki, kao što su promjer i materijal membrane. U svakom slučaju nema zvučničke jedinice koja može kvalitetno i točno reproducirati cijelo frekvencijsko područje od 20 Hz do 20 kHz. Nisko-frekvencijski, bas zvučnici trebaju imati relativno velike membrane ili velike pomake membrane kako bi generirali zvučni tlak na niskim frekvencije dovoljno visoke razine. S druge strane, zbog relativno visokih dimenzija i mase membrane, oni ne mogu reproducirati visoke frekvencije iznad 15 kHz. Ta činjenica je vrlo jasna i kada se pogledaju dimenzije instrumenata, na primjer kontrabasa i violine.

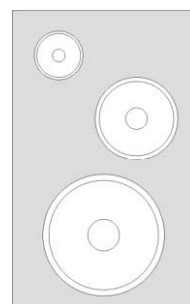
Da bi se kvalitetno reproduciralo cijelo frekvencijsko područje koristi se kombinacija dva ili više zvučnika, od kojih svaki pokriva određeno frekvencijsko područje. Prema tome se onda konstruiraju dvosistemski, trosistemski ili višesistemski zvučnici.

Dvosistemski zvučnik se sastoji od dvije zvučničke jedinice (slika 8.12a), bas, srednjetonskog zvučnika koji pokriva frekvencijsko područje od nekoliko desetaka herca do blizu 10 kHz i visokotonskog zvučnika koji pokriva frekvencije iznad recimo 10 kHz. Koja će frekvencija biti razdjelna frekvencija ovisi o karakteristikama samih zvučnika i prije konstrukcije dvosistemskog zvučnika treba dobro ispitati i proučiti karakteristike oba zvučnika.

Trosistemski zvučnik (slika 8.12b) se sastoji od tri zvučničke jedinice, bas zvučnika, srednjetonskog zvučnika i visokotonskog zvučnika. Svaki od njih je zadužen za svoje frekvencijsko područje, a zajedno pokrivaju cijeli raspon. Na jednaki način, prije konstrukcije trosistemске zvučničke kutije treba dobro odabrati pojedine komponente.



Slika 7.12a Dvosistemski zvučnik



Slika 7.12b Trosistemski zvučnik

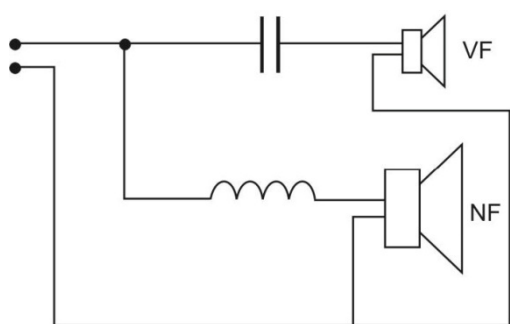
Kako bi se konstruirao efikasniji zvučnički sustav, koji uz to neće biti skup, potrebno je znati karakteristike glazbe, odnosno zvučnog signala za koji će ovaj sustav biti namijenjen. Ako se analizira spektar snage pojedine vrste glazbe, može se uočiti da rock i pop glazba imaju puno veći udio niskih frekvencija nego visokih. To znači da će veći dio energije biti sadržan na niskim nego na visokim frekvencijama. Kod klasične glazbe udio visokih frekvencija može biti viši nego kod rock ili pop glazbe. Dakle, prilikom konstrukcije zvučničkih sustava koji će prvenstveno reproducirati rock glazbu odnosno električkih snaga zvučnika kod trosistemskog sustava može biti 60% - 30% - 10% za bas – srednjetonski – visokotonski zvučnik. Dakle, ne moramo odabrati visokotonski zvučnik jednake nazivne snage kao kod bas zvučnika. To može značajno smanjiti cijenu izvedbe.

### Zvučničke skretnice

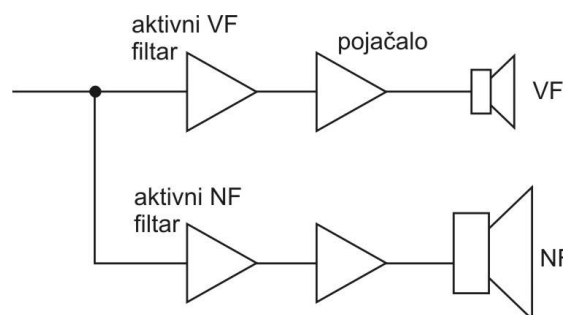
Upravo zbog činjenice da svi zvučnici nisu namijenjeni za prijenos jednake snage, ali i zbog činjenice da na primjer visokotonac nije efikasan na niskim frekvencijama, potrebno je odvojiti određeno frekvencijsko područje za pojedine zvučničke jedinice. Dakle, bas zvučniku će se dovoditi signali niskih frekvencija, srednjetonskom zvučniku signali srednjih frekvencija, a visokotonskom zvučniku signali visokih frekvencija. U tu svrhu se u zvučnike ugrađuju filtri, koji se nazivaju skretnice. Slika 8.13a prikazuje pasivnu skretnicu prvog reda za dvosistemski zvučnik. Granične frekvencije filtera se prilagođavaju samim zvučničkim jedinicama i njihovo namještanje i ugađanje nije lako, te značajno utječe na frekvencijsku karakteristiku cijelog sustava.

Pasivne skretnice su namijenjene pasivnim zvučnicima, te se sastoje od reaktivnih elemenata, kondenzatora i zavojnica, te u nekim slučajevima i dodatnim otporima za "poravnavanje" frekvencijske karakteristike.

Aktivni zvučnici u sebi sadrže pojačala, odnosno svaka zvučnička jedinica ima svoje pojačalo s aktivnim filtrima. Prednost ovih izvedbi je u puno većim mogućnostima finog namještanja skretnica, odnosno cijele frekvencijske karakteristike. Pojedina pojačala se prilagođavaju samim zvučnicima, a aktivni filtri sadrže samo kondenzatore i otpornike.



**Slika 7.13a** Pasivna skretnica prvog reda



**Slika 7.13b** Aktivna skretnica

## 7.2.4 Značajke zvučnika

### Nazivna i muzička snaga

Podatak koji se najčešće nalazi uz frekvencijsku karakteristiku zvučnika je njegova snaga. U specifikacijama zvučnika se najčešće daju podaci o nazivnoj i muzičkoj snazi, pa ih treba razlikovati. Vrijednost muzičke snage je obično viša od nazivne snage. Nazivna

snaga predstavlja efektivnu električku snagu koja se može dugotrajno privesti zvučniku bez da se uništi. Pri je spomenuto da se kod dinamičkih zvučnika najveći dio snage troši na električkom otporu zavojnice, odnosno na njeno zagrijavanje. Nazivna snaga nam govori koliko je efikasno odvođenje topline, te koliko dugo zvučnik može raditi dok se ne uništi.

Muzička snaga je zapravo nazivna snaga, ali u kratkom trenutku. Sama izvedba dinamičkih zvučnika omogućuje da se njima dovede kratki impuls puno veće snage od nazivne snage, koji će kratkotrajno zagrijati zavojnicu ali neće dovesti do uništenja zvučnika. Dakle, ova snaga nam govori koliko kratkotrajnu snagu možemo dovesti zvučniku.

Prilikom odabira zvučnika potrebno je poznavati kolika će mu se maksimalna snaga dovoditi na duže vrijeme. Ta snaga odgovara efektivnoj snazi audio signala na izlazu pojačala. Također treba znati hoće li doći do naglih povećanja signala, te koliko će oni trajati.

### *Impedancija*

U specifikacijama zvučnika slijedeći podatak koji će te naći je naziva impedancija, koja je najčešće 4 ili 8 ohma. Ova naziva impedancija predstavlja impedanciju samo u uskom frekvencijskom području. Impedancija zvučnika se mijenja s frekvencijom, te na niskim frekvencijama ima rezonantno uzvišenje, na srednjim frekvencijama pad, te ponovo raste s frekvencijom zbog induktiviteta zavojnice. Upravo zbog te činjenice, važno je da pojačalo snage bude čisto naponsko pojačalo, kod kojeg snaga neće ovisiti o promjeni opterećenja.

Također, prilikom konstrukcije zvučničke kutije, važno je uskladiti rezonanciju zvučničke kutije s rezonancijom kutije.

### *Osjetljivost*

Osjetljivost zvučnika je mjera koja govori koliko dobro zvučnik pretvara električku energiju u zvučnu. Prije je spomenuto da je efikasnost zvučnika jako niska i da se kreće ispod 1% za standardne zvučnike, te se penje do 10% za zvučnike s trubom. Osjetljivost se mjeri na takav način da se zvučniku privede električka snaga od 1W, te se na udaljenosti od 1 metra izmjeri zvučni tlak na raznim frekvencijama ili sa ružičastim šumom. Na primjer, zvučnik može imati osjetljivost 86 dB/W, što znači da će snaga od 1 W proizvesti zvučni tlak od 86 dB na udaljenosti od 1 m. Osjetljivost zvučnika s trubom se može kretati i do 118 dB. Viša osjetljivost ne znači i veću kvalitetu reprodukcije zvučnika, zapravo zvučnici s manjom osjetljivošću češće generiraju manja izobličenja.

### *Usmjerena karakteristika*

Slično kao i kod mikrofona usmjerena karakteristika govori kako osjetljivost zvučnika ovisi o kutu između osi zvučnika i mjesta slušatelja. Na niskim frekvencijama, ispod 200 Hz, zvučnici imaju omnidirekcijsku karakteristiku, dakle osjetljivost zvučnika ne ovisi o kutu. Što se frekvencija povećava to zvučnici postaju sve usmjereniji prema naprijed. Dakle, u tom slučaju položaj zvučnika igra veliku ulogu, te nije svejedno gdje se nalazite kada slušate stereo signal.

Na usmjerenost se može utjecati na više načina, na primjer s akustičkim lećama, koje zvuk usmjeravaju u točno određenom smjeru. Ove karakteristike usmjerenosti se pokazuju korisnima kod sustava ozvučenja, gdje je potrebno ozvučiti samo mali dio prostora. Spajanjem više jednakih zvučnika u bateriju zvučnika može se dobiti jako visoka

usmjerenost. Regulacijom razine i faze signala pojedinih zvučnika, postižu se još bolje karakteristike, odnosno to nam omogućuje regulaciju usmjerenosti po želji.

## 8. Struktura audio sustava

Pravilni raspored i namještanje pojačanja u sustavu ozvučenja je dosta važna stvar za optimalnu realizaciju ozvučenja. U to spada pojačanje u pojedinim komponentama sustava ozvučenja, kao i raspored zvučnika, oblik prostorije ili otvorenog prostora i tako dalje. Za svaki sustav ozvučenja je bitno nekoliko stvari.

Sustav ozvučenja mora biti tako namješten da se na svakom mjestu u publici postigne optimalna razina zvučnog tlaka, uz minimalnu razinu odnosa signal-šum, što omogućuje dobru razumljivost i dobru kvalitetu reprodukcije.

S druge strane komponente sustava ozvučenja moraju biti tako namještene, da ne dođe do izobličenja i preopterećenja sustava. Dinamika izvora zvuka je različita i to se sve treba uzeti u obzir kod namještanja.

### 8.1 Struktura pojačanja

Sustav ozvučenja se najčešće sastoji od izvora zvuka, miješala, određenih komponenata koje se nalaze iza miješala, pojačala snage i zvučnika. Napon napajanja pojedinih elektroničkih komponenata se kreće od 0 V do napona napajanja. Za potrebe naše analize pretpostavimo da je napon napajanja stabilan, odnosno da se ne mijenja s promjenom temperature, opterećenjem i slično. Naravno, u realnim sustavima to nije slučaj, ali za dobro konstruirane komponente se to može smatrati točnim.

Nažalost, donja granica razine signala nije određena razinom od 0 V, nego šumom. Ako se i zanemare izvori vanjskog šuma, sve elektroničke komponente posjeduju vlastiti šum, koji dolazi od gibanja molekula u pasivnim i aktivnim komponentama. To je takozvani termički šum, koji je neizbježan, ali se pažljivom konstrukcijom može smanjiti na optimalnu razinu. Cijela naša okolina je dosta zagađena električkim zračenjima, pa se ne smije zanemariti niti inducirani šum, pogotovo u kabelima. Dugački kabeli djeluju kao antene i primaju signale raznih frekvencija. Uporabom balansiranih kabela, pogotovo u mikrofonskim kabelima, taj šum se može dosta smanjiti. U svakom slučaju, šum postoji i on određuje donju granicu signala.

Nažalost, razina šuma ovisi o položaju potencijometara na pojedinim komponentama. Kako pojačavamo signal, pojačavamo i razinu šuma. Zbog toga je dosta bitan raspored pojačanja, odnosno karakteristika pojačanja u pojedinim komponentama. Na primjer, mikrofonsko predpojačalo mora biti jako kvalitetno, kako bi pojačalo signal niske razine na optimalnu razinu, a da pri tome razina šuma bude što manja. Zbog toga je bitno da mikrofonsko predpojačalo bude što bliže mikrofону. U nekim slučajevima se rabe audio transformatori, koji signal podižu pomoću razlike u broju navoja, što je više optimalno rješenje za jako niske signale.

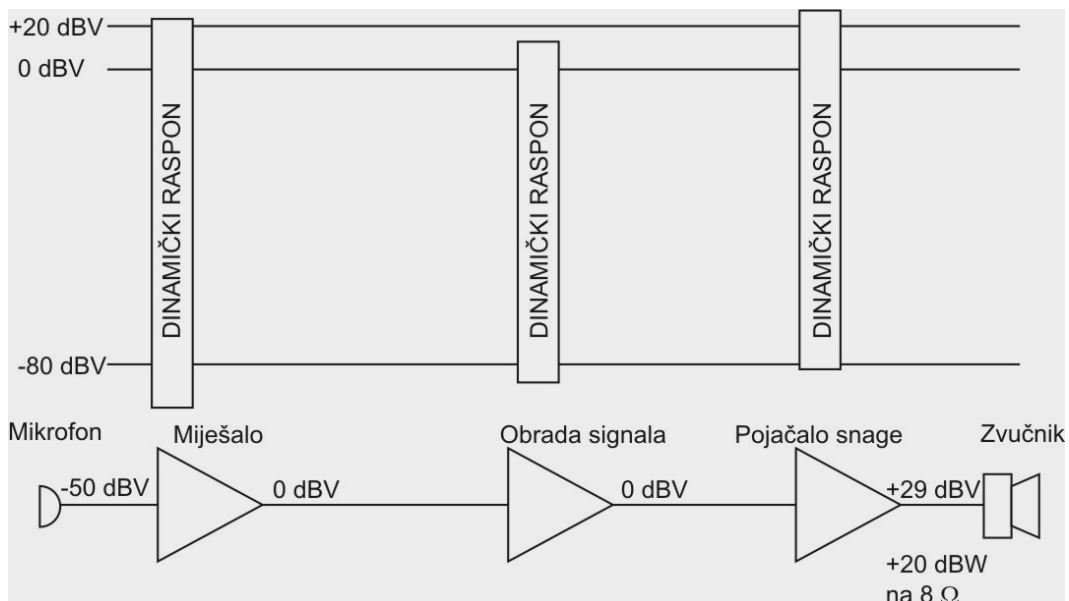
Zbog postizanja optimalne dinamike, potrebno je potencijometre, odnosno pojačanje komponenata postaviti na određenu razinu, koja će pružiti dobar odnos signal-šum, ali će spriječiti pojavu izobličenja, odnosno "rezanje" signala. Kao što je već prije spominjano odnos između maksimalnog neizobličenog signala i razine šuma određuje dinamiku sustava. Dinamika sadrži sve moguće razine koje signal može poprimiti. Kod analognih uređaja to je beskonačan broj razina, a kod digitalnih broj razina je ograničen.

Važan parametar kod kalibracije sustava pojačanja signala je rezerva signala (*headroom*). Ton majstor uvijek mora sačuvati određenu rezervu signala, kako bi mogao regulirati pojačanje. Dakle, mora odrediti optimalnu razinu, odnosno neku vrstu srednjeg pojačanja, uz koje će na određenom mjestu u publici postići željenu razinu zvučnog tlaka. U nekim slučajevima će možda trebati dodatno pojačanje signala, a pravilno kalibriran sustav će mu omogućiti da ga pojača bez neželjenih izobličenja ili preopterećenja sustava.



### 8.1.1 Metoda jediničnog pojačanja

Najjednostavnija metoda koja se koristi za kalibraciju sustava ozvučenja je metoda jediničnog pojačanja. To znači da se svi uređaji iza miješala postave na pojačanje 1 ili se razina svih uređaja postavi na jednaku vrijednost, recimo 0 dBV. Principijelna shema takve kalibracije sustava je dana na slici 8.1. Miješalo obično ima najveću dinamiku u sustavu, a sve komponente koje dolaze poslije njega nižu. Princip je da se izlaz iz miješala postavi na razinu od 0 dBV, a tako i izlazi svih ostalih komponenata iza miješala, osim naravno pojačala snage.



Slika 8.1 Metoda jediničnog pojačanja.

Prednosti ove metode su u lakoći kalibracije, jer je dovoljno samo izmjeriti razinu izlaznog signala svih komponenata. To je dosta brz postupak, koji također omogućuje brzo ubacivanje novih komponenata ili zamjenu starih. Dovoljno je samo razinu tih novo ubačenih komponenata tako postaviti da izlazni signal pokazuje 0 dBV.

Problem je u tome što sve komponente nemaju jednaki dinamički raspon. Miješalo ima veću dinamiku i svako dodatno pojačavanje signala može uzrokovati izobličenja u slijedećim komponentama, na primjer ekvalizatoru. To znači da pojačanje slijedećih komponenata moramo smanjiti ispod jediničnog, to znači da izlazni signal bude niži od 0 dBV.

### 8.1.2 Optimizirana metoda jediničnog pojačanja

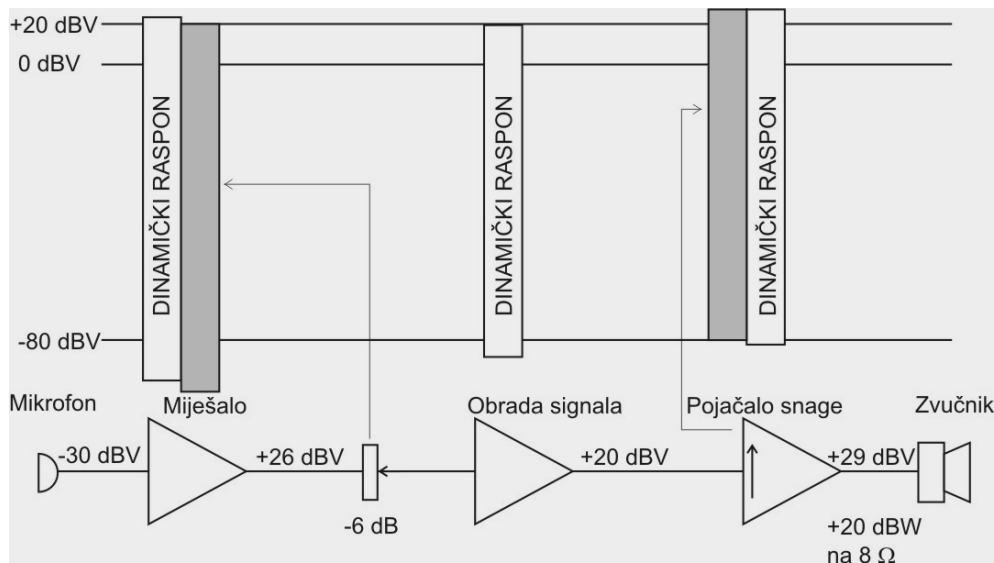
Bolje rješenje, ali i kompliciranije za provesti je optimizirana metoda jediničnog pojačanja, koja u obzir uzima različite dinamike pojedinih komponenata.

Princip kalibriranja se bazira na generiranju sinusnog signala na ulazu u miješalo određene razine, na primjer -30 dBV, koja predstavlja optimalnu razinu ulaznih signala. Zadnji potencijometar, koji će služiti za reguliranje glasnoće cijelog sustava, dovesti u takav položaj koji će na izlazu iz miješala generirati "rezanje" signala (*clipping*).

Pojačanje slijedeće komponente postaviti na 1 i provjeriti da li je došlo do rezanja signala na izlazu iz te komponente. Ako je razinu signala na ulazu u tu komponentu smanjiti točno dok ne započne rezanje signala. Ako komponenta nema ulazni

potencijometar, potrebno je ugraditi dodatni. Istu proceduru provesti za sve sljedeće komponente.

Slika 8.2 prikazuje principijelnu shemu optimizirane metode jediničnog pojačanja.



**Slika 8.2** Optimizirana metoda jediničnog pojačanja.

Na ovaj način se postiže da kada miješalo dosegne maksimalnu razinu signala, onda će i sve ostale komponente postići maksimalnu razinu signala. Dakle, namještanje razine se može odvijati samo na miješalu, bez opasnosti da će komponente iza miješala ući u izobličenje ili preopterećenje.

Na taj način je optimiziran odnos signal-šum u svim komponentama, a VU metar na miješalu služi kao precizan indikator razine za sve komponente nakon miješala, ali i razine zvučnog tlaka na određenom mjestu.

Nedostaci ove metode su duže vrijeme kalibracije, potrebno znanje o komponentama i odgovarajući mjerni uređaj koji će detektirati izobličenja signala. U nekim slučajevima je potrebna ugradnja dodatnih potencijometara, što povećava troškove ozvučenja. Zamjena komponentata i ubacivanje novih je komplicirana, jer treba ponoviti cijeli postupak kalibracije.

## 8.2 Snaga pojačala i zvučnika

Nakon što smo proveli kalibraciju miješala i svih komponentata, potrebno je namjestiti izlaznu snagu pojačala i odabrati odgovarajuće zvučnike. Bitno je da izlazna razina u miješalu (npr. 0 dBV) odgovara određenoj razini zvučnog tlaka na mjestu slušatelja. Dakle pojačanje pojačala se podiže dok se ne postigne odgovarajuća razina. Ako se uoči da pojačalo generira izobličenja treba uzeti pojačalo s većom dinamikom, odnosno veće snage. Jednako vrijedi za zvučnike. Razinu možemo održati jednakom bez ugradnje jačih pojačala, ako koristimo više pojačala i zvučnika jednake snage.

Kod odabira snage pojačala, bitno je razlikovati specifikacije pojačala. Maksimalna snaga pojačala se određuje sa sinusnim signalom, odnosno mjerenjem razine izlaznog signala na nazivnom opterećenju za specificirano frekvencijsko područje i specificirano vrijeme. Razina signala se podiže dok se ne dosegne rezanje signala, odnosno dok izobličenja naglo ne porastu. Ovaj podatak nam govori koliku maksimalnu razinu signala možemo postići, a da ne dođe do izobličenja. Kako se za mjerenje razine signala rabe VU

metri koji mjere efektivnu razinu signala, treba poznavati vršni faktor signala, kako bi znali koliku maksimalnu efektivnu razinu signala možemo postići a da ne dođe do izobličenja.

Efektivnoj razini u pojačalima odgovara kontinuirana snaga zvučnika, koja generira kontinuiranu disipaciju topline u zavojnici zvučnika, a da ne dođe do uništenja zvučnika. Ta snaga odgovara Ohmovom zakonu o disipaciji snage na opterećenju  $P=U^2/R$ .

Kako je potrebno nego vrijeme da se zavojnica ugrije, proizlazi da zvučnici u nekom kratkom vremenu mogu reproducirati signal više razine od razine kontinuirane snage, dakle razine veće od napona  $U$ . To je takozvana muzička snaga, a proizlazi iz činjenice da je vršni faktor kratkih tranzijentnih signala relativno visok, odnosno odnos između maksimalne i efektivne vrijednosti je jako velik. Dakle, iako je maksimalna razina signala kratkog impulsa visoka, njegova efektivna razina će ostati relativno niska, pa neće doći do pregrijavanja zavojnice. Naravno, ako se da viša razina signala održi neko duže vrijeme, onda će i njegova efektivna razina porasti, a time će i porasti zagrijavanje zavojnice.

Dakle za određivanje snage zvučnika, bitno je poznavati vršni faktor signala koji će se reproducirati, odnosno poznavati vrstu glazbe i govora. Također je bitan frekvencijski pojas, jer udio zvučne energije u govoru i glazbi opada s porastom frekvencije. Na primjer, udio niskih frekvencija kod rock glazbe je puno veći nego visokih frekvencija. Zbog toga, ako se odabere subwoofer snage od 100 W nije potrebno odabrati visokotonac jednake snage, neko će možda biti dovoljan onaj snage 30 W.

Kod pojačala je stvar drugačija, jer je maksimalna razina ograničena naponom napajanja, te će i kratkotrajna povećanja razine signala možda uzrokovati izobličenja. Dakle kod pojačala moramo imati veću rezervu efektivne snage nego kod zvučnika.

Na primjer, neka je vršni faktor signala 6 dB, a nazivna snaga zvučnika 50 W. Zvučnik će moći **kratkotrajno** izdržati veću snagu od 50 W, upravo za tih 6 dB, a pojačalo mora moći reproducirati to povećanje bez izobličenja, pa će potrebna snaga pojačala biti 17 dBW (50W) + 6 dB = 23 dBW → 200 W. To znači da moramo odabrati pojačalo čija nazivna snaga je barem 4 puta veća od nazivne snage zvučnika.

Dakle vidljivo je da je vršni faktor signala dosta bitan faktor za određivanje snage pojačala i zvučnika. Vršni faktor glazbe i govora se može mijenjati do čak 20 dB. Dakle, bilo bi dobro pojačala mjeriti sa signalima koji imaju sličnije karakteristike prirodnim signalima, govoru i glazbi. Test stvarne maksimalne snage zvučnika zahtijeva fizičko uništavanje zvučnika, tako da se moraju dobro proučiti specifikacije proizvođača zvučnika.

Konzervativni pristup određivanju snage pojačala i zvučnika bi bio slijedeći. Odrediti potrebu kontinuiranu snagu zvučnika u W. Tu snagu povećati četiri puta za određivanje snage pojačala. To omogućuje povećanje razine u pojačalu za 6 dB bez pojave izobličenja. Pri tome paziti da pojačalo kod tog signala ne ulazi u "rezanje" signala (*clipping*).

### 8.3 Proračun razglasa

Iako se za pravi proračun razglasa rabe kompleksne jednačbe i posebni programi, ovdje će radi razumijevanja osnovnih problema ozvučenja biti dane neke osnovne jednačbe za proračun razglasa, odnosno sustava ozvučenja. Dakle, biti će dani osnovni modeli sustava ozvučenja, koji će nam dati okvirnu sliku o osnovnim parametrima.

#### 8.3.1 Jednostavni model ozvučenja

Kada govorimo o jednostavnom modelu ozvučenja mislimo na sustav ozvučenja na otvorenom. To znači da proučavamo model kod kojeg nema pojave refleksija ili echo

efekta, nego imamo otvoreni prostor, gdje jedini osnovni parametar na koji trebamo obratiti pažnju je pad razine signala s udaljenosti.

Na slici 8.3 dana je shema jednostavnog sustava ozvučenja sa slijedećim parametrima:

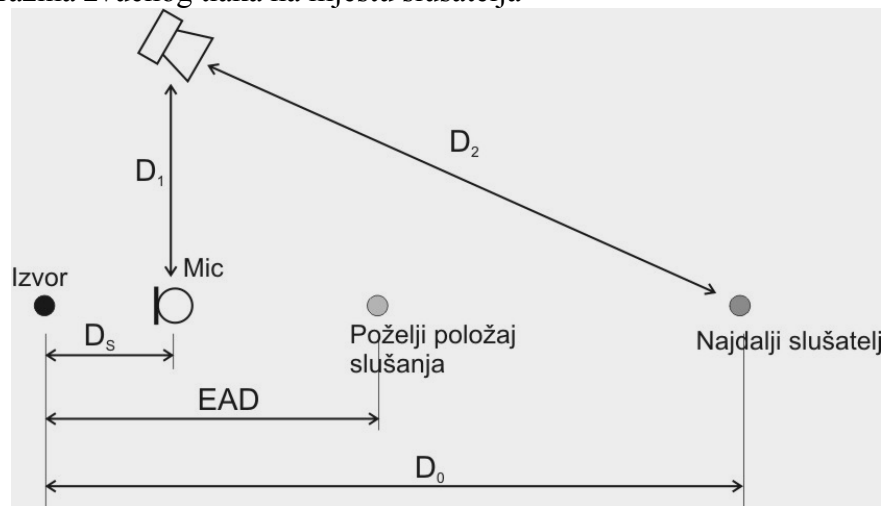
$D_s$  – udaljenost između izvora i mikrofona

$D_1$  – udaljenost između zvučnika i mikrofona

$D_2$  – udaljenost između zvučnika i slušatelja (obično najudaljenijeg)

$D_0$  – udaljenost između izvora i slušatelja (obično najudaljenijeg)

$L_p$  – razina zvučnog tlaka na mjestu slušatelja



**Slika 8.3** Shema jednostavnog sustava ozvučenja

Prva i osnovna karakteristika zvuka je da njegov intenzitet opada s udaljenosti, a pri tome se rabi zakon obrnutog kvadrata, koji nam govori za da dvostruku udaljenost, razina signala padne za 6,02 dB. Ako želimo izračunati razinu zvučnog tlaka  $L_p'$  na udaljenosti  $D'$  u odnosu na razinu zvučnog tlaka  $L_p$  na udaljenosti  $D$ , možemo se poslužiti slijedećom jednakosti:

$$L_p' = L_p - 20 \log \frac{D'}{D}$$

Na primjer, neka je  $L_p=110$  dB,  $D=4$  m i  $D'=200$  m, tada će  $L_p'=76$  dB.

#### Akustički dobitak (Acoustic Gain)

Glavni zadatak sustava ozvučenja je kako njegov naziv kaže pojačati signal izvora zvuka na mjestu slušatelja. Dakle, cilj je postići potrebnu razinu, kako bi se izvor mogao čuti na određenom mjestu. Izraz akustički dobitak određuje razliku u decibelima, na mjestu slušatelja, između razine zvučnog tlaka sa "uključenim" i "isključenim" sustavom ozvučenja. Akustički dobitak se može izraziti matematički prema izrazu:

$$\text{Akustički dobitak} = L_p(\text{on}) - L_p(\text{off})$$

Odgovarajući akustički dobitak je primarni cilj svakog sustava ozvučenja. Akustički dobitak se može vrlo lako izmjeriti uporabom zvukomjera na određenim mjestima. Kao što

će se vidjeti malo kasnije, potreban je određeni minimalni akustički dobitak kako bi se postigao odgovarajući odnos signal-šum i razumljivost.

### Mikrofonija i potencijalni akustički dobitak

Akustički dobitak jednostavnog sustava ozvučenja se može podići jednostavnim podizanjem razine signala, ali pri određenoj razini, pojačanje će biti prekinuto pojavom mikrofonije, odnosno pozitivne povratne veze u sustavu. Mikrofonija je neželjeni efekt kada mikrofon "snimi" signal sa zvučnika, taj signal uđe u sustav i pojačan ponovo izađe kroz zvučnike van, te ponovo u mikrofon.

Potencijalni akustički dobitak ili  $PAG$  je maksimalni akustički dobitak prije pojave mikrofonije. Za dani jednostavni sustav ozvučenja  $PAG$  se može matematički odrediti iz odnosa udaljenosti sa slike 8.3:

$$PAG = 20 \log \frac{D_0 D_1}{D_s D_2}$$

Ovaj primjer u obzir uzima slučaj samo s jednim mikrofonom. Dodavanjem većeg broja mikrofona povećava se vjerojatnost pojave mikrofonije i smanjuje se potencijalni akustički dobitak. Osnovna jednadžba za  $PAG$  se može modificirati, tako da uključuje određeni broj mikrofona  $NOM$ :

$$PAG = 20 \log \frac{D_0 D_1}{D_s D_2} - 10 \log NOM$$

Iskustva su pokazala da sustav koji radi vrlo blizu  $PAG$  razine pokazuje pojavu *ringing* efekta i isticanje određenih frekvencija. Uz to, u slučaju zatvorenih prostorija, sustav koji radi blizu  $PAG$  razine će povećati efektivno vrijeme odjeka prostorije. Zbog toga se uvodi margina stabilnosti mikrofonije (FSM) tako da se od  $PAG$  razine odbije dodatnih 6 dB. Sustavi koji rade 6 dB niže od početne  $PAG$  razine ne pokazuju gore spomenute probleme, pa se početna jednakost za  $PAG$  može dodatno modificirati:

$$PAG = 20 \log \frac{D_0 D_1}{D_s D_2} - 10 \log NOM - 6 \text{ dB}$$

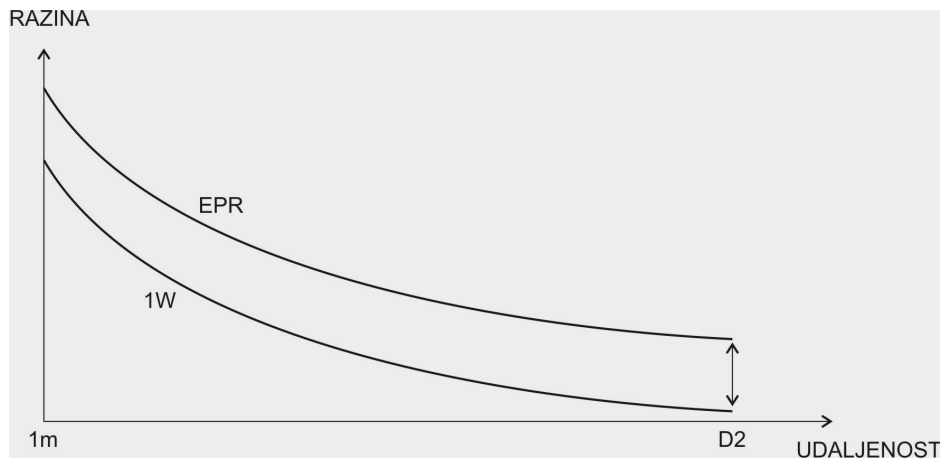
### Šum, rezerva i potrebna električna snaga

U sustavima ozvučenja je uvijek prisutan šum, bilo kao šum samih komponenata, ili kao šum okoline (buka, vjetar, publika,...). Šum sprečava da slušatelj dobro čuje i razumije izvor zvuka. Idealno, zvuk koji dolazi iz zvučnika bi treba biti minimalno 25 dB iznad razine buke, odnosno šuma. Tih 25 dB je općenito pravilo koje omogućuje postizanje da slušatelj dobro čuje izvor zvuka.

Ako je na primjer prosječna razina okolne buke 45 dB (obično se mjeri prema A karakteristici), a potreban je minimalni odnos signal-šum od 25 dB, to znači da je željena razina signala na mjestu slušatelja  $45+25=70$  dB. Tih 70 dB je prosječna razina zvučnog tlaka, tako da treba uzeti u obzir maksimalne razine zvučnog tlaka, koje se mogu pojaviti. Razlika između maksimalne razine i prosječne razine se zove rezerva (*headroom*) signala. Za sustave ozvučenja koji služe za reprodukciju govora, smatra se da je 10 dB rezerve

dovoljno, tako da će za ovaj primjer maksimalna potrebna razina signala biti 80 dB. Za glazbu se smatra da je dovoljno 20 dB rezerve.

Za potrebe naše analize uzeti ćemo rezervu od 10 dB. Postavlja se pitanje kolika nam je snaga pojačala potrebna da se na određenoj udaljenosti postigne potrebna razina signala. Zadani su osjetljivost zvučnika, potrebna razina zvučnog tlaka  $L_p$  na željenoj udaljenosti  $D_2$  i rezerva  $H$ . Osjetljivost zvučnika predstavlja razinu zvučnog tlaka koju zvučnik emitira na udaljenosti 1 m od membrane, kada mu se privede električna snaga od 1 W. Potrebna električna snaga se može izračunati iz potrebnog odnosa razina zvučnog tlaka na određenoj udaljenosti kada se zvučniku privede snaga od 1 W i potrebna viša snaga. Princip proračuna je dan na slici 8.4.



**Slika 8.4** Princip proračuna potrebne električne snage.

Na primjer, kada zvučniku dovedemo električnu snagu od 1 W, na udaljenosti od 1 m on će reproducirati razinu zvučnog tlaka od  $L_s=113$  dB. Na udaljenosti  $D_2=40$  m, razina zvučnog tlaka će u tom slučaju biti:

$$L_{P(D_2)}(1W) = L_{P(1m)} - 20 \cdot \log \frac{D_2}{1m} = 80,96 \text{ dB}$$

Na mjestu  $D_2$  želimo postići razinu  $L_p=90$  dB uz rezervu  $H=10$  dB, što znači ukupno 100 dB. Vidimo da je potrebna razina manja od razine koja se postiže s električnom snagom od 1 W, tako da snagu pojačala moramo povećati za  $100 \text{ dB} - 80,96 \text{ dB} = 19,04 \text{ dB}$ . Dakle, vrijedi:

$$19,04 \text{ dB} = 10 \cdot \log \frac{EPR}{1W} \rightarrow EPR = 80,2 \text{ W}$$

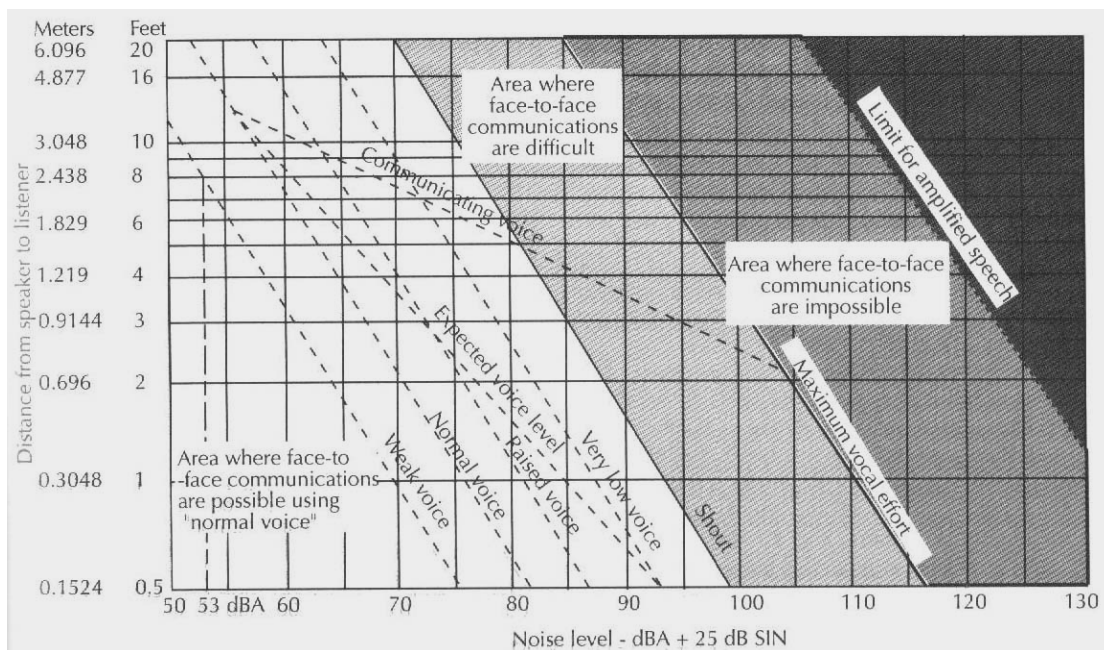
Općenito, potrebna električna snaga  $EPR$  se može izračunati iz slijedeće jednakosti:

$$EPR = 10^{\frac{L_p + H - L_s + 20 \log \frac{D_2}{1m}}{10}}$$

### Ekvivalentna akustička udaljenost (EAD)

U najjednostavnijem sustavu ozvučenja, takoreći bez ozvučenja, slušatelj bi mogao stajati blizu izvora zvuka i čuti ga bez potrebe za pojačanjem signala. Jednostavnim eksperimentom se može odrediti koliko blizu slušatelj treba biti izvoru zvuka da ga može dobro čuti, odnosno razumjeti. Jednostavno govorite normalnim glasom i udaljavajte se od slušatelja, dok komunikacija, odnosno razumljivost ne postane teška. Tada hodajte nazad prema slušatelju, dok se ne postigne ugodna razina za komunikaciju. Ta udaljenost označava ekvivalentnu akustičku udaljenost (EAD). Ideja svakog sustava ozvučenja je postizanje razine zvučnog tlaka na određenom mjestu, a koja će odgovarati ekvivalentnoj akustičkoj udaljenosti.

U pojednostavljenom sustavu, cilj je postići minimalni odnos signal-šum od 25 dB. Ako se pretpostavi razina buke, odnosno šuma 45 dB, potrebna razina na mjestu slušatelja će biti 70 dB. Prema dijagramu na slici 8.5 za normalnu razinu glasa (*normal voice*) i razinu od 70 dB (buka plus 25 dB) izvor zvuka će trebati biti na udaljenosti od oko 0,7 metara kako bi se postigla željena razina signala. Uz povišeni glas (*raised voice*), govornik će se moći udaljiti na oko 1,2 metra. Ovisno o vrsti izvora zvuka, jedna od ovih udaljenosti će biti potrebna ekvivalentna akustička udaljenost.



**Slika 8.5** Dijagram odnosa razine zvučnog tlaka i potrebne udaljenosti. (izvor: Ballou, Handbook for Sound Engineers)

Ako je poznata razina izvora zvuka  $L_{pt}$  na nekoj referentnoj udaljenosti (npr. 1 m)  $D_s$  moguće je izračunati  $EAD$  parametar uz željenu razinu na mjestu slušatelja  $L_{pd}$ :

$$EAD = D_s 10^{\frac{L_{pt} - L_{pd}}{20}}$$

### Potreban akustički dobitak (NAG)

Postavlja se pitanje koliki je potrebni akustički dobitak kako bi se postigla željena razina  $L_p$  za danu razinu izvora zvuka? Ovaj akustički dobitak (NAG) je pojačanje u decibelima potrebno za generiranje željene razine na mjestu slušatelja  $L_{pd}$  uz danu prethodno izračunatu ekvivalentnu akustičku udaljenost EAD. Ako je  $D_0$  udaljenost do najdaljeg slušatelja, onda je potrebni akustički dobitak:

$$NAG = 20 \log \frac{D_0}{EAD}$$

Ako je NAG razina manja od PAG razine, onda možemo smatrati da neće doći do pojave mikrofonije. Ako je pak s druge strane PAG razina manja od NAG razine, moguće je da će doći do pojave mikrofonije, jer će se podizanjem razine prijeći potencijalni akustički dobitak. Ovdje su pretpostavljeni omnidirekcijski mikrofoni. Poboljšanja akustičkog dobitka prije pojave mikrofonije se mogu postići uporabom više usmjerenih mikrofona i zvučnika. Usmjereni mikrofoni može povećati potencijalni akustički dobitak za 6 dB, ali sve ovisi o stvarnom rasporedu mikrofona i zvučnika. Tako da je općenito pravilo, sustav projektirati za omnidirekcijske mikrofone i zvučnike.

### **8.3.2 Sustav ozvučenja zatvorenih prostora**

Kod proračuna ozvučenja zatvorenih prostora potrebno je u obzir uzeti akustiku prostorije, odnosno efekte, kao što su odjek, echo, odnosno na refleksije signala u prostoriji. U nekim slučajevima, odjek može biti koristan, jer pojačava dojam glazbe. Na primjer, u crkvama, kada sviraju orgulje. Za zvuk orgulja je poželjno veće vrijeme odjeka, jer to poboljšava sam zvuk orgulja. Ali, u većini drugih slučajeva preveliki odjek nije poželjan, jer prevelika razina refleksija utječe na odnos signal-šum i smanjuje razumljivost. Prije slaganja ozvučenja zatvorenih prostora, posebnu pažnju treba posvetiti akustičkoj obradi prostorije, tako da se refleksije, odnosno odjek svede na optimalnu razinu.

U svrhu slijedećih proračuna pretpostavili smo slijedeće. Prostorije koje ćemo analizirati nemaju echo efekta, te se u prostoriji postiže statistički slučajno reverberantno polje, odnosno ujednačeno vrijeme odjeka u svim dijelovima prostorije. Odnos intenziteta direktnog i reflektiranog zvuka je jednak u cijeloj prostoriji, a visoki odnos jamči dobru razumljivost.

#### Q faktor zvučnika

Na gore spomenute parametre prostorije dosta utječe jedan važan parametar zvučnika, koji određuje njegovu usmjerenost, a označava se sa slovom  $Q$ . Kada zvučnik ima kuglastu karakteristiku usmjerenosti, dakle omnidirekcijsku, njegov  $Q$ -faktor će iznositi 1. Kako se povećava usmjerenost zvučnika to će i njegov  $Q$ -faktor rasti. Usmjerenost zvučnika je dosta važna prilikom proračuna ozvučenja u prostoriji. Pomoću jako usmjerenih zvučnika možemo točno "pokriti" određene dijelove prostorije, te na taj način poboljšati sustav ozvučenja, odnosno smanjiti neželjene efekte.

$Q$ -faktor zvučnika se može odrediti mjerenjem razine zvučnog tlaka na glavnoj osi i zvučnog tlaka pod nekim kutom od glavne osi. Indeks usmjerenosti se računa prema

$$DI = 10 \cdot \log Q$$



Konstanta prostorije –  $R$ 

Konstanta prostorije je mjera relativne "živosti" neke prostorije. Živa prostorija će imati dobro razvijeno reverberantno polje. Niska konstanta prostorije znači jako "živu" prostoriju. Visoki  $R$  znači "mrtvu" prostoriju. Vrijednost  $R$  ovisi o veličini prostorije, tako da specifična vrijednost  $R$  nije dovoljna za ocjenu karakteristika refleksija prostorije. Ako su poznati ukupna površina prostorije  $S$  i prosječni koeficijent apsorpcije  $\hat{a}$ , konstantna prostorije se može izračunati prema slijedećoj jednakosti:

$$R = \frac{S\hat{a}}{1 - \hat{a}}$$

Kritična udaljenost –  $D_c$ 

Kritična udaljenost, je udaljenost od izvora zvuka na kojoj je razina direktnog signala jednaka razini refleksija. Kritična udaljenost je važna za nekoliko parametara, uključujući razumljivost.

Dobra ocjena kritične udaljenosti za neki zvučnik u nekoj prostoriji se može dobiti reprodukcijom ružičastog šuma i mjerenjem razine zvučnog tlaka pomoću zvukomjera. Polaganim odmicanjem od zvučnika, na nekoj udaljenosti razina zvučnog tlaka će se prestati mijenjati, odnosno s povećanjem udaljenosti se više neće mijenjati. Vraćanjem prema zvučniku, zaustavite se kada razina zvučnog tlaka poraste za 3 dB. Ta udaljenost će biti kritična udaljenost, jer kako su na toj poziciji razina direktnog zvuka i reflektiranog zvuka jednake, ukupna razina će biti 3 dB viša od razine samo reflektiranog zvuka.

Kritična udaljenost ovisi o Q-faktoru izvora i apsorpciji u prostoriji, stoga ovisi o frekvenciji, a ovaj test prikazuje samo kritičnu udaljenost za širokopojasni signal. Za dani zvučnik u nekoj prostoriji, kritična udaljenost se može izračunati prema slijedećoj jednakosti:

$$D_c = \sqrt{\frac{QS\hat{a}}{16\pi N}} = 0,141 \cdot \sqrt{\frac{QS\hat{a}}{N}}$$

$N$  je ukupni broj zvučnika koji reproduciraju jednaku akustičku snagu kao i zvučnik usmjeren prema najdaljem slušatelju.

Gušenje zvuka u zatvorenim prostorima

I u zatvorenim prostorima vrijedi zakon inverznog kvadrata, ali samo da direktni zvuk. Pretpostavljeno je da je razina reflektiranog zvuka svugdje jednaka po prostoriji, dakle razina reverberantnog polja se ne mijenja s udaljenosti od izvora zvuka, nego je konstantna. Dakle ukupna razina signala u nekoj točki je suma direktnog zvuka, umanjenog zbog povećanja udaljenosti i razine reverberantnog polja, koje se ne mijenja s udaljenosti:

$$L_{p'} = L_p - \left( 20 \log \frac{D'}{D} - 10 \log \frac{g(D')}{g(D)} \right)$$

$D$  – početna udaljenost od izvora zvuka  
 $D'$  – nova udaljenost od izvora zvuka  
 $L_p$  – razina na udaljenosti  $D$   
 $L_p'$  – nova razina na udaljenosti  $D'$   
 $g(x)$  – dolazi iz  $g(x) = Dc^2 + x^2$ , gdje je  $x$  neka udaljenost

Ova jednakost je jednaka onoj za otvorene prostore samo je uključen zadnji član koji se odnosi na reverberantno polje.

### Potrebna električna snaga

I u ovom slučaju možemo izračunati potrebnu električnu snagu pojačala, kako bi se postigla željena razina na određenoj udaljenosti. Jednadžba za proračun je slična jednadžbi koja se odnosi na otvorene prostore, ali z dodatak koji se odnosi na reverberantno polje.

$$EPR = 10^{\frac{L_p + H - L_s + 20 \log \frac{D_2}{1m} - 10 \log \frac{g(D_2)}{g(1m)}}{10}}$$

Ovdje su  $L_p$  željena razina na udaljenosti  $D_2$ ,  $H$  rezerva i  $L_s$  osjetljivost zvučnika.

Također se postavlja pitanje da li će doći do mikrofonijske, pa se jednadžbe za  $PAG$  i  $NAG$  razine moraju modificirati, odnosno uključiti doprinos reverberantnog polja.

$$PAG = 20 \log \frac{D_0 D_1}{D_s D_2} - 10 \log NOM - 6 \text{ dB} - 10 \log \frac{g(D_0) g(D_1)}{g(D_s) g(D_2)}$$

$$NAG = 20 \log \frac{D_0}{EAD} - 10 \log \frac{g(D_0)}{g(EAD)}$$

Kao i u slučaju otvorenog prostora, da ne bi došlo do mikrofonijske  $PAG > NAG$ .

Ovdje su dane samo osnovne jednadžbe za proračun jednostavnijih prostora. Za proračun razglasta za kompleksnije prostore, danas se koriste razni računalni programi, koji simuliraju sustav ozvučenja, te u obzir uzimaju sve parametre prostorije.

## Riješeni zadaci

### Zadatak 8.1

Sustav ozvučenja zatvorene prostorije (kritična udaljenost=15 m) se sastoji od dva zvučnika i dvokanalnog pojačala. Zvučnici imaju osjetljivost od 100 dB (1W/1m). Potrebna razina na udaljenosti 40 m od svakog zvučnika je 80 dB. Rezerva signala je 10 dB. Izračunajte potrebnu ukupnu snagu pojačala u W.

Ukupna razina zvučnog tlaka dva nekoherentna izvora se može izračunati prema slijedećoj jednakosti:

$$L[\text{dB}] = 10 \cdot \log(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots)$$

gdje su  $L1$  i  $L2$  dvije razine zvučnog tlaka na istom mjestu.

Kako se u ovom slučaju radi o dva jednaka izvora signala (dva zvučnika) koji su jednako udaljeni do točke mjerenja, da bi se postigla razina od 80 dB, prema prethodnoj jednakosti, svaki od zvučnika mora na toj točki mjerenja postići 77 dB.

Uz 1W električke snage, uz danu osjetljivost zvučnika, na udaljenosti od 40 m svaki zvučnik će postići:

$$L = 100 \text{ [dB]} - 20 \cdot \log \frac{40 \text{ [m]}}{1 \text{ [m]}} = 67,96 \text{ dB} \approx 68 \text{ dB}$$

Ako se u obzir uzme i rezerva signala svaki zvučnik na mjestu slušanja mora postići  $77+10=87$  dB.

Razlika od potrebne do postignute snage uz 1W je  $87-68=19$  dB.

Ova razlika se može nadoknaditi odabirom zvučnika veće osjetljivosti, što obično nije moguće, nego povećanjem električke snage koja se dovodi zvučniku.

Uz pretpostavku linearnog sustava, povećanje snage u dB će odgovarati 19 dB.

Potrebno povećanje snage se računa u odnosu na električku snagu od 1 W, pa će potrebna snaga za postizanje potrebne razine jednog zvučnika biti:

$$P = 1[\text{W}] \cdot 10^{19/10} = 79,4 \text{ W}$$

Kako se radi o dvokanalnom pojačalu koje napaja dva zvučnika ukupna snaga pojačala će biti 158,8 W.