















Nivo zvuka – zašto? (1)

Dinamički opseg
čujnosti uva:
 $10^{-12} \text{W/m}^2 \div 1 \text{W/m}^2$.















Izražavanje veličina
intenziteta zvuka
sistemom malih brojeva
za uobičajene zvučne
događaje;
npr. normalan razgovor
 0.000001W/m^2

Efekat	Odnos intenziteta zvuka (referentna vrednost)	Intenzitet zvuka [W/m^2]	Tipični izvor zvuka
Ozbiljno oštećenje sluha	100 000 000 000 000	100	 Lansiranje rakete u blizini lansirne rampe
Oštećenje sluha i bol	10 000 000 000 000	10	 Motor mlaznjaka (na rastojanju od 25 m)
Oštećenje sluha posle kratkog izlaganja	1 000 000 000 000	1	 Prag bola Sirena za vazdušni napad (na rastojanju od 5 m)
Ozbiljna opasnost od oštećenja sluha	100 000 000 000	10^{-1}	 Koncert rok muzike uz binu
Opasnost po sluh	10 000 000 000	10^{-2}	 Uzletanje mlaznjaka (300 m)
Izvesna opasnost po sluh	1 000 000 000	10^{-3}	 Bučna industrijska hala
Dejstvo na zdravlje	100 000 000	10^{-4}	 Težak kamion, 70 km/h (na rastojanju od 10 m)
Izvesna dejstva na zdravlje Ozbiljna neprijatnost	10 000 000	10^{-5}	 Automobil, 60 km/h (na rastojanju od 10 m)
Neprijatnost	1 000 000	10^{-6}	 Normalan razgovor (na rastojanju od 1m)
Izvesna neprijatnost	100 000	10^{-7}	 Tih razgovor (na rastojanju od 1m)
Dobro okruženje	10 000	10^{-8}	 Prigušena muzika sa radija
	1 000	10^{-9}	 Šaputanje (na rastojanju od 1 m)
	100	10^{-10}	 Tiha spavaća soba
	10	10^{-11}	 Šuštanje lišća
Neprijatno "tiho"	Referentna vrednost	10^{-12}	Anehoična prostorija
			Prag čujnosti

Nivo zvuka – zašto? (2)

Korišćenjem linearne skale veliki broj uobičajenih zvučnih događaja bio bi između 0 i 1W/m^2 a mali broj između 1 i 10W/m^2 .











Teško uočavanje zvučnih događaja između 0 i 1W/m^2 .

Efekat	Odnos intenzita zvuka (referentna vrednost)	Intenzitet zvuka [W/m^2]	Tipični izvor zvuka
Ozbiljno oštećenje sluha	100 000 000 000 000	100	 Lansiranje rakete u blizini lansirne rampe
Oštećenje sluha i bol	10 000 000 000 000	10	 Motor mlaznjaka (na rastojanje od 25 m)
Oštećenje sluha posle kratkog izlaganja	1 000 000 000 000	1	 Prag bola Sirena za vazdušni napad (na rastojanju od 5 m)
Ozbiljna opasnost od oštećenja sluha	100 000 000 000	10^{-1}	 Koncert rok muzike uz binu
Opasnost po sluh	10 000 000 000	10^{-2}	 Uzletanje mlaznjaka (300 m)
Izvesna opasnost po sluh	1 000 000 000	10^{-3}	 Bučna industrijska hala
Dejstvo na zdravlje	100 000 000	10^{-4}	 Težak kamion, 70 km/h (na rastojanju od 10 m)
Izvesna dejstva na zdravlje	10 000 000	10^{-5}	 Automobil, 60 km/h (na rastojanju od 10 m)
Ozbiljna neprijatnost	1 000 000	10^{-6}	 Normalan razgovor (na rastojanju od 1m)
Neprijatnost	100 000	10^{-7}	 Tih razgovor (na rastojanju od 1m)
Izvesna neprijatnost	10 000	10^{-8}	 Prigušena muzika sa radija
Dobro okruženje	1 000	10^{-9}	 Šaputanje (na rastojanju od 1 m)
	100	10^{-10}	 Tiha spavaća soba
	10	10^{-11}	 Šuštanje lišća
Neprijatno "tiho"	Referentna vrednost	10^{-12}	Anehoična prostorija
			Prag čujnosti

Nivo zvuka – zašto? (3)

Otežana komparacija
različitih zvučnih
događaja.

Komparacija
podrazumeva korišćenje
sistema velikih brojeva,
npr. odnos praga bola i
praga čujnosti $10^{12}:1$.

Efekat	Odnos intenzita zvuka (referentna vrednost)	Intenzitet zvuka [W/m^2]	Tipični izvor zvuka
Ozbiljno oštećenje sluha	100 000 000 000 000	100	 Lansiranje rakete u blizini lansirne rampe
Oštećenje sluha i bol	10 000 000 000 000	10	 Motor mlaznjaka (na rastojanje od 25 m)
Oštećenje sluha posle kratkog izlaganja	1 000 000 000 000	1	 Prag bola Sirena za vazdušni napad (na rastojanju od 5 m)
Ozbiljna opasnost od oštećenja sluha	100 000 000 000	10^{-1}	 Koncert rok muzike uz binu
Opasnost po sluh	10 000 000 000	10^{-2}	 Uzletanje mlaznjaka (300 m)
Izvesna opasnost po sluh	1 000 000 000	10^{-3}	 Bučna industrijska hala
Dejstvo na zdravlje	100 000 000	10^{-4}	 Težak kamion, 70 km/h (na rastojanju od 10 m)
Izvesna dejstva na zdravlje Ozbiljna neprijatnost	10 000 000	10^{-5}	 Automobil, 60 km/h (na rastojanju od 10 m)
Neprijatnost	1 000 000	10^{-6}	 Normalan razgovor (na rastojanju od 1m)
Izvesna neprijatnost	100 000	10^{-7}	 Tih razgovor (na rastojanju od 1m)
Dobro okruženje	10 000	10^{-8}	 Prigušena muzika sa radija
	1 000	10^{-9}	 Šaputanje (na rastojanju od 1 m)
	100	10^{-10}	 Tiha spavaća soba
	10	10^{-11}	 Šuštanje lišća
Neprijatno "tiho"	Referentna vrednost	10^{-12}	Anehoična prostorija
			Prag čujnosti

Nivo zvuka – zašto? (4)

Logaritamska priroda osetljivosti uha

Veber-Fehnerov zakon:

Subjektivni osećaj jačine zvuka proporcionalan je logaritmu fizičke pobude (zvučnom pritisku ili intenzitetu zvuka)

$$\Lambda \sim \log p$$

Nivo zvuka – zašto? (5)

Logaritamska priroda osetljivosti uha

Veberov zakon:

Subjektivni osećaj promene jačine zvuka proporcionalan je procentualnoj promeni fizičke pobude (zvučnog pritiska i intenziteta zvuka)

$$\Delta\Lambda \sim \frac{\Delta p}{p}$$

Subjektivna jačina zvuka menja se za isti iznos, linearno, kada se zvučni pritisak menja za isti procenat, eksponencijalno.

Pri nošenju tereta od 10kg, dodavanje 1kg predstavlja promenu težine koja se može osetiti. Ako se, međutim, nosi teret od 100kg, dodavanje 1kg predstavljaće neosetnu promenu. Tek promena za isti procenat, dodavanje 10kg, predstavlja približno ekvivalentnu promenu po subjektivnom osećaju.

Nivo zvuka – definicija (1)

- ▶ Nivo određuje relativni odnos dve veličine ali ne i apsolutnu vrednost i u opštem slučaju određuje se kao logaritamski odnos dve veličine:

$$n = \mathbf{\log} \frac{I_1}{I_2} [\text{Bel}]$$

- ▶ Imajući u vidu male promene zvuka koje uvo zapaža, a u cilju dobijanja finije podela skale nivoa, za nivo zvuka uzeta je deset puta manja jedinica - decibel [dB]:

$$n = 10 \mathbf{\log} \frac{I_1}{I_2} [\text{dB}]$$

- ▶ Da bi se odredio apsolutni iznos određene veličine potrebno je imati vrednost jedne od veličina, tzv. referentnu vrednost.

Nivo zvuka – definicija (2)

- ▶ Za nivo zvuka usvojena je konvencija da se kao referentna vrednost uzima vrednost koja odgovara pragu čujnosti na 1000Hz. Na decibelskoj skali referentna vrednost predstavlja nulu i svaka druga vrednost se poredi sa njom.
- ▶ Referentne vrednosti:

$$\begin{aligned} p_0 &= 2 \cdot 10^{-5} [\text{Pa}] = 20 [\mu\text{Pa}] & a_0 &= 10^{-6} [\text{m/s}^2] = 1 [\mu\text{m/s}^2] \\ I_0 &= 10^{-12} [\text{W/m}^2] = 1 [\text{pW/m}^2] & v_0 &= 10^{-9} [\text{m/s}] = 1 [\text{nm/s}] \\ P_0 &= 10^{-12} [\text{W}] = 1 [\text{pW}] & \xi_0 &= 10^{-12} [\text{m}] = 1 [\text{pm}] \end{aligned}$$

Nivo zvuka – definicija (3)

- Nivo veličina koje definišu generisanje i prostiranje zvučnih talasa:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad L_P = 10 \log \frac{P_a}{P_0}$$
$$L_a = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad L_v = 20 \log \frac{v}{v_0} \quad L_\xi = 20 \log \frac{\xi}{\xi_0}$$

- Nivo zvuka se izražava ili preko nivoa zvučnog pritiska ili nivoa intenziteta zvuka koji **SAMO** u uslovima slobodnog zvučnog polja imaju istu vrednost.














$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} = 20 \log \frac{p}{p_0} [\text{dB}]$$

- **NIVO ZVUKA JE OBJEKTIVNA VELIČINA.**

Nivo zvuka – skala (1)














Dinamički opseg
čujnosti uva:
0÷120dB.

Izražavanje veličina
nivoa zvuka pomoću
brojeva sa malim
brojem cifara.

Efekat	Odnos intenziteta zvuka (referentna vrednost)	I [W/m ²]	L [dB]	Tipični izvor zvuka
Ozbiljno oštećenje sluha	100 000 000 000 000	100	140	 Lansiranje rakete u blizini lansirne rampe
Oštećenje sluha i bol	10 000 000 000 000	10	130	 Motor mlaznjaka (na rastojanje od 25 m)
Oštećenje sluha posle kratkog izlaganja	1 000 000 000 000	1	120	 Prag bola Sirena za vazdušni napad (na rastojanju od 5 m)
Ozbiljna opasnost od oštećenja sluha	100 000 000 000	10 ⁻¹	110	 Koncert rok muzike uz binu
Opasnost po sluh	10 000 000 000	10 ⁻²	100	 Uzletanje mlaznjaka (300 m)
Izvesna opasnost po sluh	1 000 000 000	10 ⁻³	90	 Bučna industrijska hala
Dejstvo na zdravlje	100 000 000	10 ⁻⁴	80	 Težak kamion, 70 km/h (na rastojanju od 10 m)
Izvesna dejstva na zdravlje Ozbiljna neprijatnost	10 000 000	10 ⁻⁵	70	 Automobil, 60 km/h (na rastojanju od 10 m)
Neprijatnost	1 000 000	10 ⁻⁶	60	Normalan razgovor (na rastojanju od 1m)
Izvesna neprijatnost	100 000	10 ⁻⁷	50	 Tih razgovor (na rastojanju od 1m)
Dobro okruženje	10 000	10 ⁻⁸	40	 Prigušena muzika sa radija
	1 000	10 ⁻⁹	30	 Šaputanje (na rastojanju od 1 m)
	100	10 ⁻¹⁰	20	 Tiha spavaća soba
	10	10 ⁻¹¹	10	 Šuštanje lišća
Neprijatno "tiho"	Referentna vrednost	10 ⁻¹²	0	Anehoična prostorija
				Prag čujnosti














Nivo zvuka – skala (2)

Korišćenjem nivoa zvuka lakše se raspoređuje veći broj uobičajenih zvučnih događaja na logaritamskoj skali.

Efekat	Odnos intenzita zvuka (referentna vrednost)	I [W/m ²]	L [dB]	Tipični izvor zvuka
Ozbiljno oštećenje sluha	100 000 000 000 000	100	140	 Lansiranje rakete u blizini lansirne rampe
Oštećenje sluha i bol	10 000 000 000 000	10	130	 Motor mlaznjaka (na rastojanje od 25 m)
Oštećenje sluha posle kratkog izlaganja	1 000 000 000 000	1	120	 Prag bola Sirena za vazdušni napad (na rastojanju od 5 m)
Ozbiljna opasnost od oštećenja sluha	100 000 000 000	10 ⁻¹	110	 Koncert rok muzike uz binu
Opasnost po sluh	10 000 000 000	10 ⁻²	100	 Uzletanje mlaznjaka (300 m)
Izvesna opasnost po sluh	1 000 000 000	10 ⁻³	90	 Bučna industrijska hala
Dejstvo na zdravlje	100 000 000	10 ⁻⁴	80	 Težak kamion, 70 km/h (na rastojanju od 10 m)
Izvesna dejstva na zdravlje Ozbiljna neprijatnost	10 000 000	10 ⁻⁵	70	 Automobil, 60 km/h (na rastojanju od 10 m)
Neprijatnost	1 000 000	10 ⁻⁶	60	Normalan razgovor (na rastojanju od 1m)
Izvesna neprijatnost	100 000	10 ⁻⁷	50	 Tih razgovor (na rastojanju od 1m)
Dobro okruženje	10 000	10 ⁻⁸	40	 Prigušena muzika sa radija
	1 000	10 ⁻⁹	30	 Šaputanje (na rastojanju od 1 m)
	100	10 ⁻¹⁰	20	 Tiha spavaća soba
	10	10 ⁻¹¹	10	 Šuštanje lišća
Neprijatno "tiho"	Referentna vrednost	10 ⁻¹²	0	Anehoična prostorija
				Prag čujnosti

Nivo zvuka – skala (3)














Komparacija različitih zvučnih događaja sistemom brojeva sa manje cifara.

Efekat	Odnos intenzita zvuka (referentna vrednost)	I [W/m ²]	L [dB]	Tipični izvor zvuka
Ozbiljno oštećenje sluha	100 000 000 000 000	100	140	 Lansiranje rakete u blizini lansirne rampe
Oštećenje sluha i bol	10 000 000 000 000	10	130	 Motor mlaznjaka (na rastojanje od 25 m)
Oštećenje sluha posle kratkog izlaganja	1 000 000 000 000	1	120	 Prag bola Sirena za vazdušni napad (na rastojanju od 5 m)
Ozbiljna opasnost od oštećenja sluha	100 000 000 000	10 ⁻¹	110	 Koncert rok muzike uz binu
Opasnost po sluh	10 000 000 000	10 ⁻²	100	 Uzletanje mlaznjaka (300 m)
Izvesna opasnost po sluh	1 000 000 000	10 ⁻³	90	 Bučna industrijska hala
Dejstvo na zdravlje	100 000 000	10 ⁻⁴	80	 Težak kamion, 70 km/h (na rastojanju od 10 m)
Izvesna dejstva na zdravlje Ozbiljna neprijatnost	10 000 000	10 ⁻⁵	70	 Automobil, 60 km/h (na rastojanju od 10 m)
Neprijatnost	1 000 000	10 ⁻⁶	60	Normalan razgovor (na rastojanju od 1m)
Izvesna neprijatnost	100 000	10 ⁻⁷	50	 Tih razgovor (na rastojanju od 1m)
Dobro okruženje	10 000	10 ⁻⁸	40	 Prigušena muzika sa radija
	1 000	10 ⁻⁹	30	 Šaputanje (na rastojanju od 1 m)
	100	10 ⁻¹⁰	20	 Tiha spavaća soba
	10	10 ⁻¹¹	10	 Šuštanje lišća
Neprijatno "tiho"	Referentna vrednost	10 ⁻¹²	0	Anehoična prostorija
				Prag čujnosti

Nivo zvuka – skala (4)

Jednake promene nivoa bilo gde na dB skali subjektivno se ocenjuju kao jednake promene jačine zvuka, tako da je nivo zvuka mera subjektivne jačine.

promena nivoa	ocena
1dB	neuočljivo
3dB	na granici uočavanja
6dB	uočljivo
10dB	jasno uočljivo

Efekat	Odnos intenzita zvuka (referentna vrednost)	I [W/m ²]	L [dB]	Tipični izvor zvuka
Ozbiljno oštećenje sluha	100 000 000 000 000	100	140	 Lansiranje rakete u blizini lansirne rampe
Oštećenje sluha i bol	10 000 000 000 000	10	130	 Motor mlaznjaka (na rastojanje od 25 m)
Oštećenje sluha posle kratkog izlaganja	1 000 000 000 000	1	120	 Prag bola Sirena za vazdušni napad (na rastojanju od 5 m)
Ozbiljna opasnost od oštećenja sluha	100 000 000 000	10 ⁻¹	110	 Koncert rok muzike uz binu
Opasnost po sluh	10 000 000 000	10 ⁻²	100	 Uzletanje mlaznjaka (300 m)
Izvesna opasnost po sluh	1 000 000 000	10 ⁻³	90	 Bučna industrijska hala
Dejstvo na zdravlje	100 000 000	10 ⁻⁴	80	 Težak kamion, 70 km/h (na rastojanju od 10 m)
Izvesna dejstva na zdravlje Ozbiljna neprijatnost	10 000 000	10 ⁻⁵	70	 Automobil, 60 km/h (na rastojanju od 10 m)
Neprijatnost	1 000 000	10 ⁻⁶	60	Normalan razgovor (na rastojanju od 1m)
Izvesna neprijatnost	100 000	10 ⁻⁷	50	 Tih razgovor (na rastojanju od 1m)
Dobro okruženje	10 000	10 ⁻⁸	40	 Prigušena muzika sa radija
	1 000	10 ⁻⁹	30	 Šaputanje (na rastojanju od 1 m)
	100	10 ⁻¹⁰	20	 Tiha spavaća soba
	10	10 ⁻¹¹	10	 Šuštanje lišća
Neprijatno "tiho"	Referentna vrednost	10 ⁻¹²	0	Anehoična prostorija
				Prag čujnosti

Nivo zvuka – konverzija (1)

Formula:

$$p = 1 \text{ Pa}$$

$$L_p = 20 \log \frac{1}{20 \times 10^{-6}}$$

$$= 20 \log 50\,000$$

$$= 94 \text{ dB}$$

$$p = 31.7 \text{ Pa}$$

$$L_p = 20 \log \frac{31.7}{20 \times 10^{-6}}$$

$$= 20 \log 1.58 \times 10^6$$

$$= 124 \text{ dB}$$

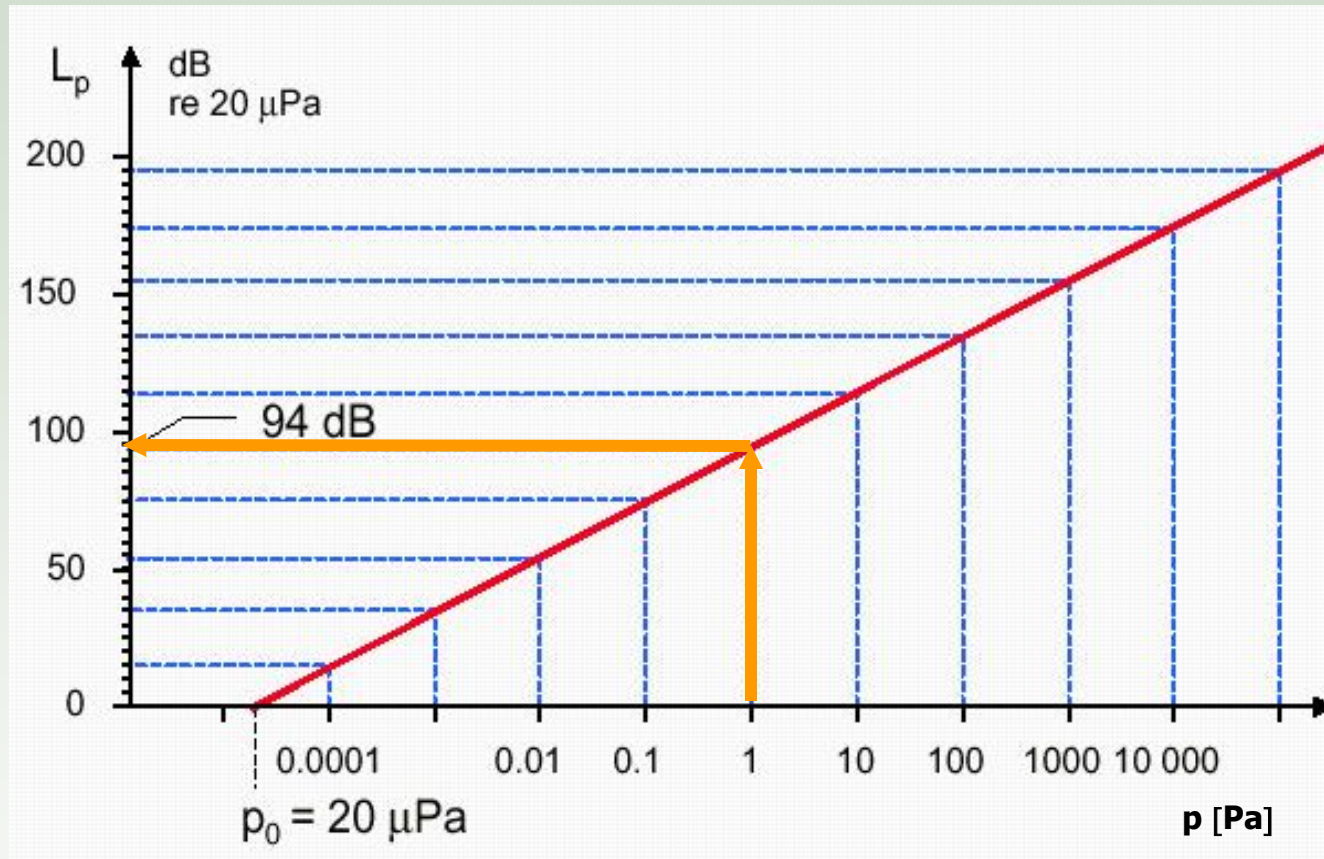
Nivo zvuka – konverzija (2)

Tabela:

Odnos pritisaka	- db +	Odnos pritisaka	Odnos pritisaka	- db +	Odnos pritisaka
1.00	0.0	1.000	0.501	6	1.995
0.989	0.1	1.012	0.447	7	2.239
0.977	0.2	1.023	0.398	7	2.512
0.966	0.3	1.035	0.355	9	2.818
0.955	0.4	1.047	0.316	10	3.162
0.944	0.5	1.059	0.251	12	3.981
0.933	0.6	1.072	0.200	14	5.012
0.923	0.7	1.084	1.158	16	6.310
0.912	0.8	1.096	0.126	18	7.943
0.902	0.9	1.109	0.100	20	10.000
0.891	1.0	1.122	0.0316	30	31.62
0.841	1.5	1.189	0.0100	40	100
0.794	2.0	1.259	0.0032	50	316.2
0.708	3.0	1.413	10^{-3}	60	10^3
0.631	4.0	1.585	10^{-4}	80	10^4
0.562	5.0	1.778	10^{-5}	100	10^5

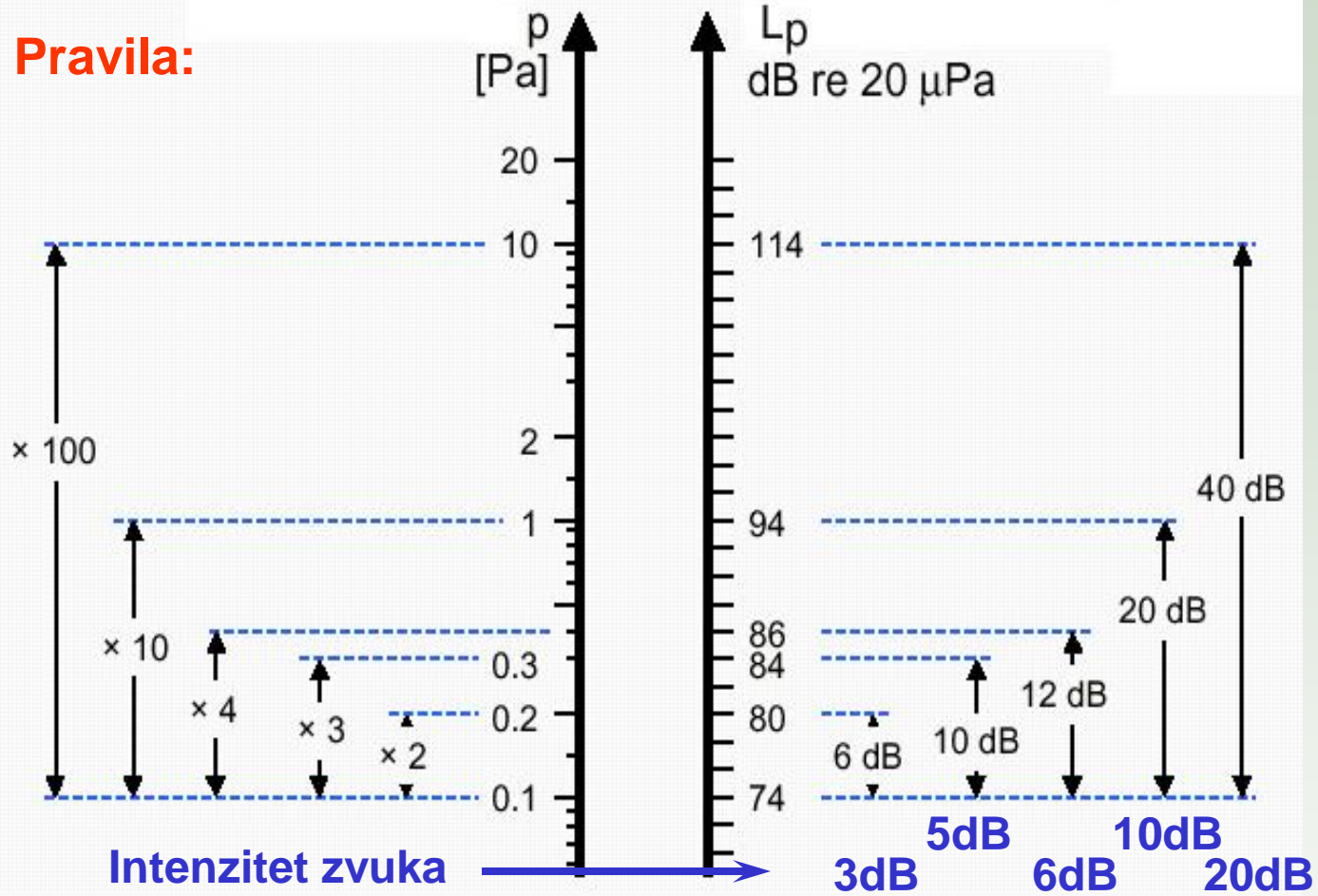
Nivo zvuka – konverzija (3)

Grafik:



Nivo zvuka – konverzija (4)

Pravila:



Sabiranje nivoa složenog zvuka (1)

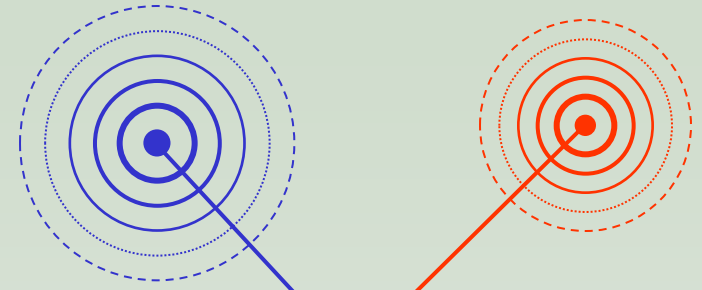
▶ Za složeni zvuk:

$$I_R = I_1 + I_2$$



$$L_R = 10 \log \frac{I_R}{I_0}$$

DVA IZVORA



$$L_1 = 10 \log \frac{I_1}{I_0}$$

$$L_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0}$$

$$L_R = 10 \log \frac{I_1 + I_2}{I_0} = 10 \log \left(\frac{I_1}{I_0} + \frac{I_2}{I_0} \right)$$

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \Rightarrow \frac{I}{I_0} = 10^{L/10}$$

$$L_R = 10 \log \left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} \right)$$

Sabiranje nivoa složenog zvuka (2)

$$L_R = 10 \log(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10})$$

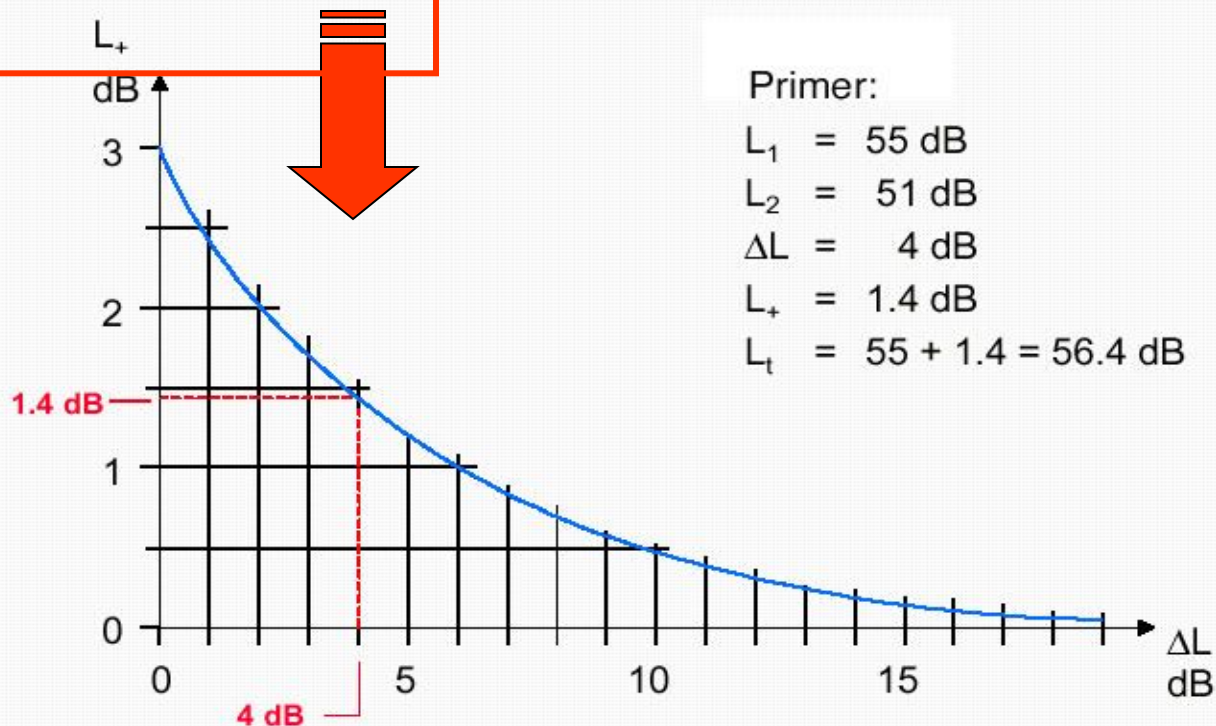
$$= 10 \log 10^{L_1/10} [1 + 10^{(L_2-L_1)/10}]$$

$$= 10 \log 10^{L_1/10} + 10 \log [1 + 10^{(L_2-L_1)/10}]$$

$$= L_1 + L_+$$

$$L_+ = 10 \log [1 + 10^{-(L_1-L_2)/10}] = 10 \log [1 + 10^{-\Delta L/10}]$$

$$\Delta L = L_1 - L_2$$



Sabiranje nivoa složenog zvuka (3)

Postupak:

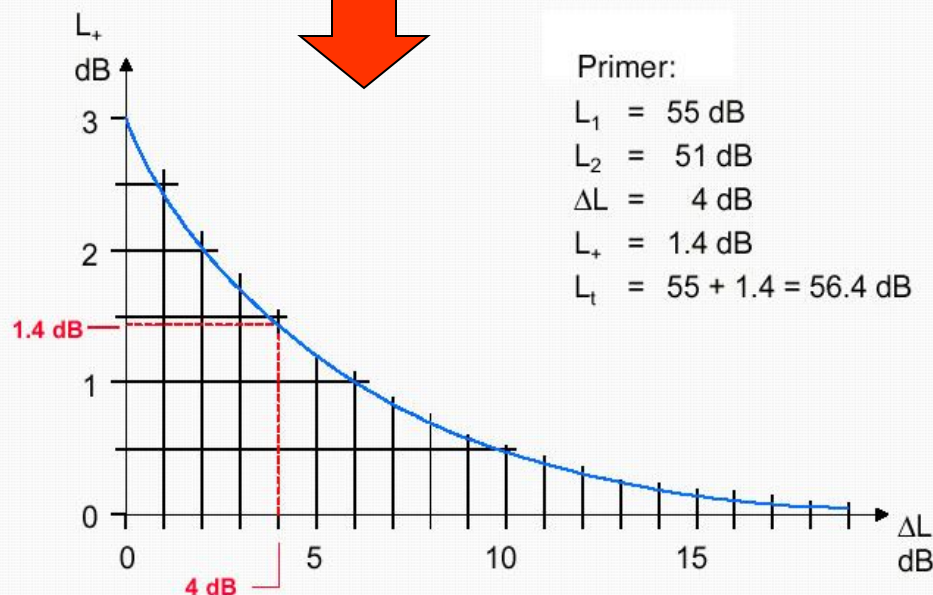
1. Izračunavanje razlike dva nivoa:

$$\Delta L = L_1 - L_2, L_1 > L_2$$

2. Određivanje L_+ na osnovu grafika ili prethodno prikazane jednačine.

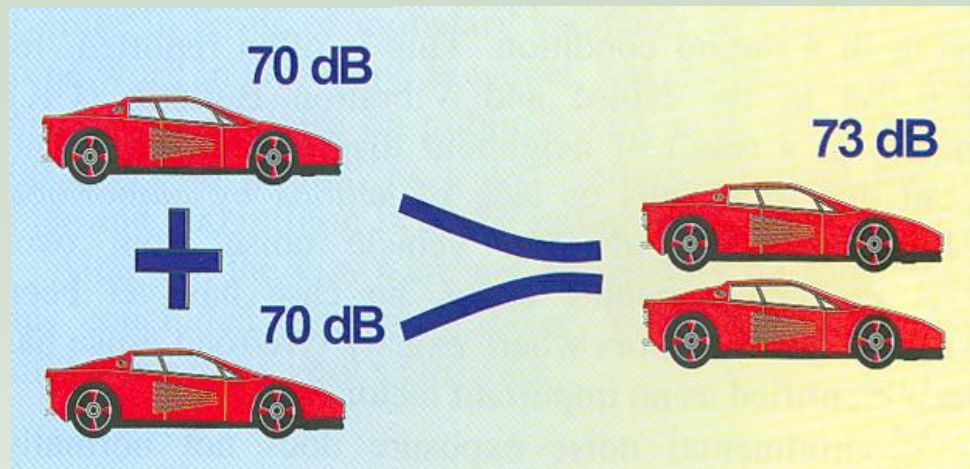
3. Dodavanje L_+ većem nivou daje rezultujući nivo.

$$L_R = L_1 + L_+$$



Sabiranje nivoa složenog zvuka (4)

➤ Za dva identična izvora:



Pravila:

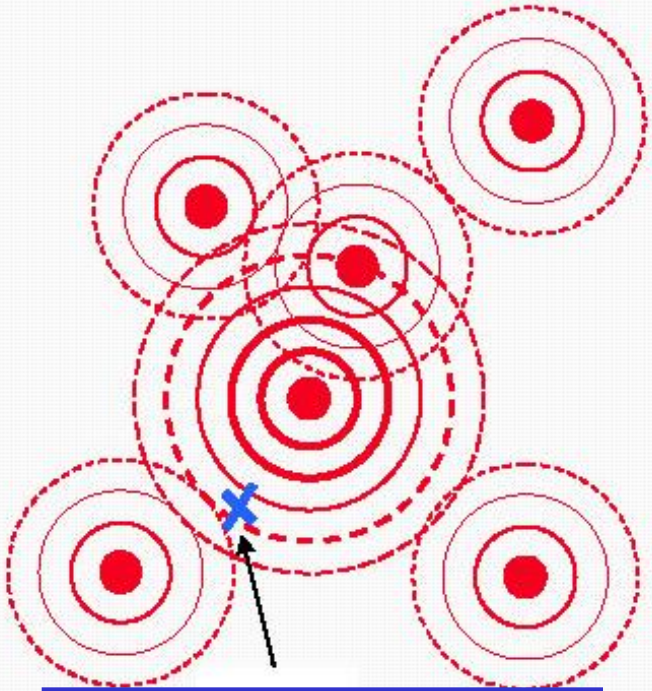
1. Za dva ista nivoa rezultujući nivo je za 3 dB veći.

$$0 \text{ dB} + 0 \text{ dB} = 3 \text{ dB}$$

2. Ako je razlika nivoa veća od 10dB, rezultujući nivo jednak je većem nivou.

Sabiranje nivoa složenog zvuka (5)

VIŠE IZVORA

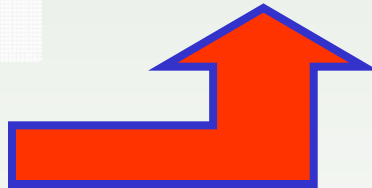


$$L_R = 10 \log \frac{I_R}{I_0} = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{I_0}$$

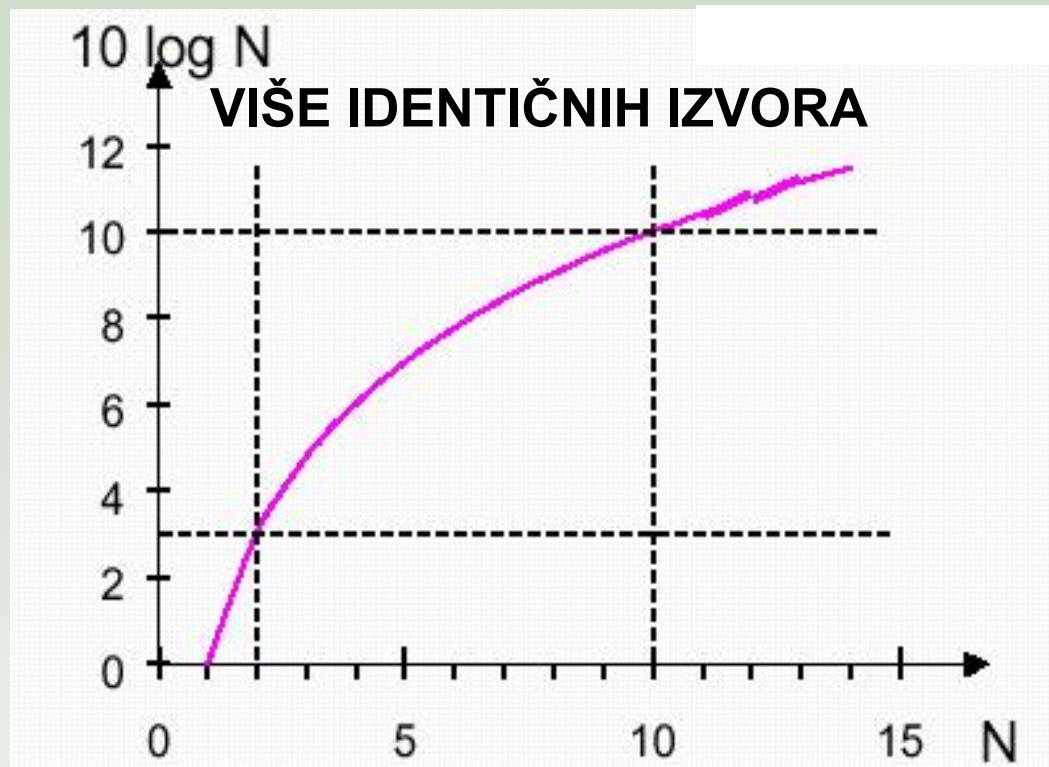
$$L_R = 10 \log \frac{p_R^2}{p_0^2} = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^n p_i^2}{p_0^2}$$

$$L_R = 10 \log \left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_n/10} \right)$$

$$L_R = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10}$$



Sabiranje nivoa složenog zvuka (6)

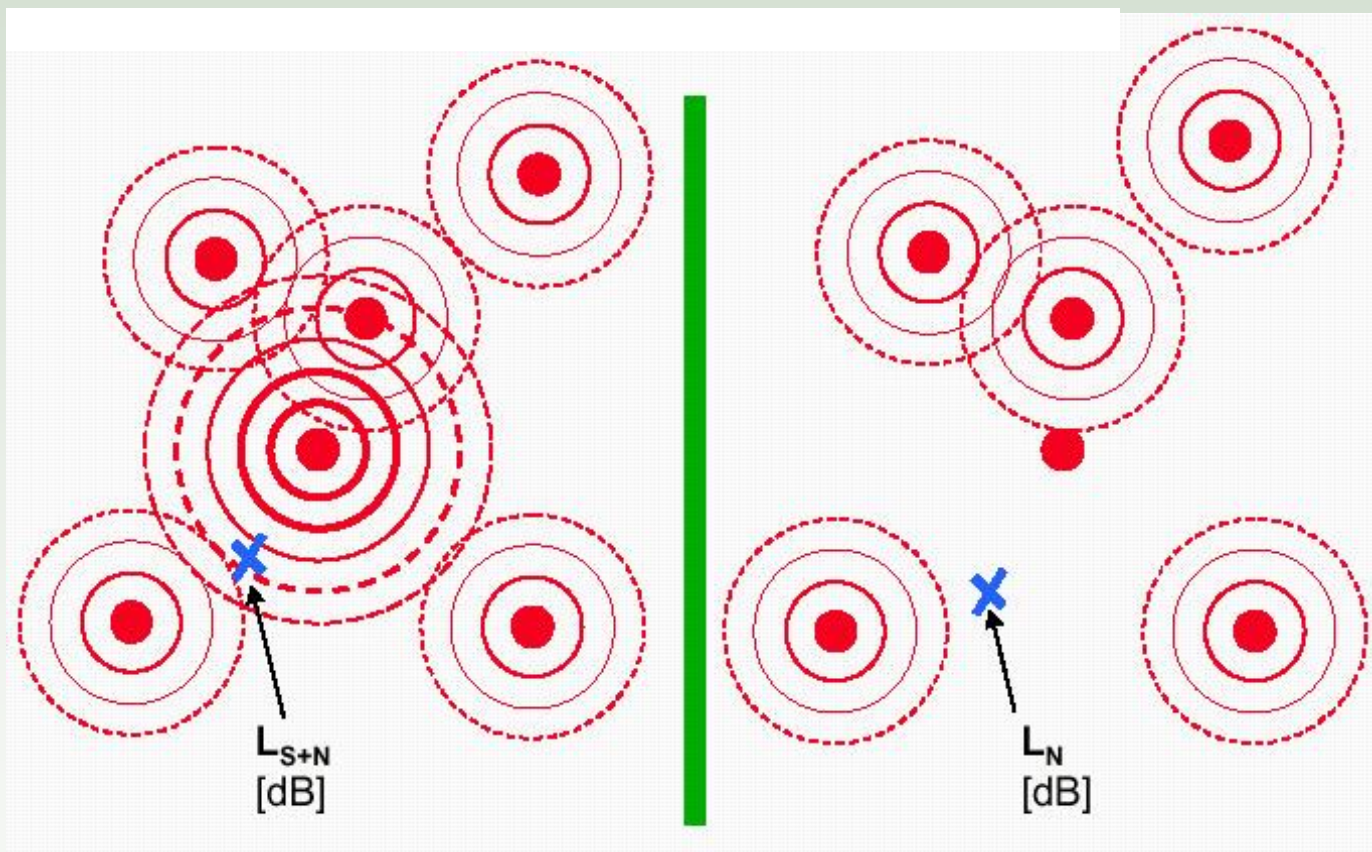


$$L_1 = L_2 = L_3 = \dots = L_n$$

$$L_R = L_1 + 10 \log N$$

Oduzimanje nivoa složenog zvuka (1)

- Postupak oduzimanja nivoa zvuka primenjuje se u slučaju kada se određuje nivo zvuka u prisustvu pozadinskog zvuka (drugih izvora – koji se ne mogu isključiti).



Oduzimanje nivoa složenog zvuka (2)

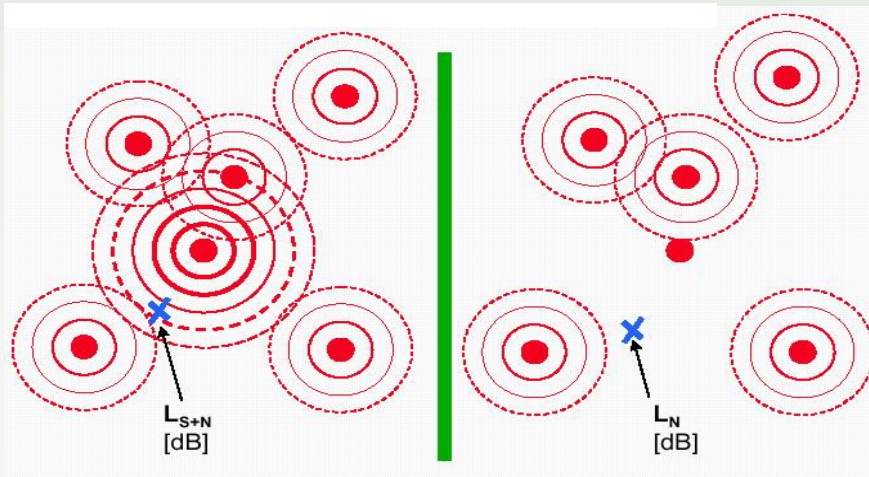
$$I_S = I_{S,N} - I_N = I_0 \cdot 10^{L_{S,N}/10} - I_0 \cdot 10^{L_N/10}$$

$$L_S = 10 \log \frac{I_S}{I_0} = 10 \log(10^{L_{S,N}/10} - 10^{L_N/10})$$

$$L_S = 10 \log 10^{L_{S,N}/10} (1 - 10^{\frac{L_{S,N} - L_N}{10}})$$

$$L_S = 10 \log 10^{L_{S,N}/10} + 10 \log(1 - 10^{\frac{L_{S,N} - L_N}{10}}) = L_{S,N} - L_-$$

$$L_- = -10 \log(1 - 10^{\frac{L_{S,N} - L_N}{10}}) = -10 \log(1 - 10^{\frac{\Delta L}{10}})$$



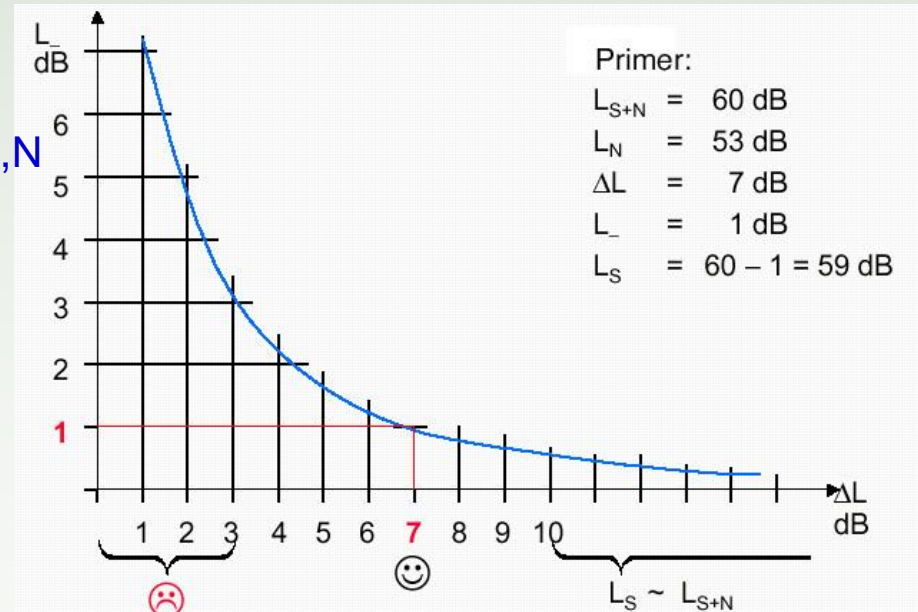
$$\Delta L = L_{S,N} - L_S$$

Oduzimanje nivoa složenog zvuka (3)

Postupak:

1. Merenje ukupnog nivoa zvuka izvora i pozadinskog zvuka (buke), $L_{S,N}$
2. Isključivanje izvora zvuka i merenje pozadinskog nivoa zvuka (buke), L_N
3. Izračunavanje razlike dva nivoa:
4. Određivanje L_- na osnovu grafika ili prethodno prikazane jednačine
5. Oduzimanje L_- od nivoa $L_{S,N}$

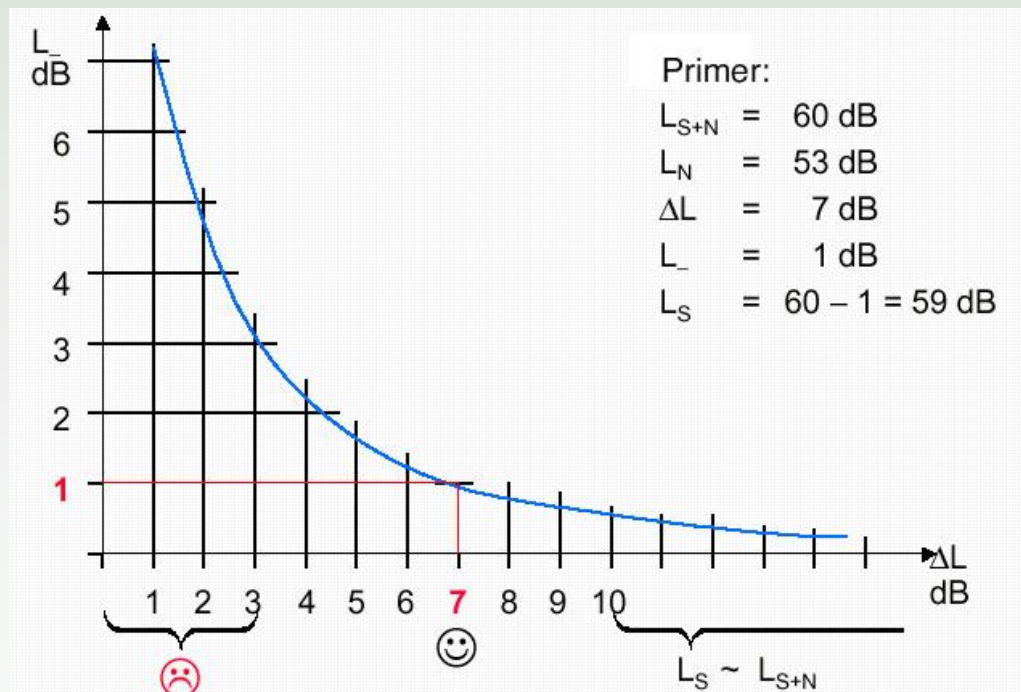
$$L_S = L_{S,N} - L_-$$



Oduzimanje nivoa složenog zvuka (4)

Pravila:

- ⊕ Ako je ΔL manje od 3dB, pozadinska buka je prevelika za tačno merenje i mora se smanjiti.
- ⊕ Ako je ΔL veće od 10dB pozadinska buka se može ignorisati.
- ⊕ U ostalim slučajevima izmereni ukupni nivo buke treba korigovati za uticaj pozadinske buke opisanim postupkom.



Subjektivna jačina zvuka (1)

- Promene objektivnog nivoa zvuka odgovaraju subjektivnom osećaju promene jačine zvuka.

IPAK ...

- Objektivni nivo zvuka ne daje potpunu informaciju o subjektivnom osećaju jačine zvuka, odnosno ljudskoj reakciji na utvrđeni nivo.

TAKO DA ...

- Postoji izvesno neslaganje između objektivnih vrednosti i subjektivnog doživljaja zvučnog nadražaja.

Subjektivna jačina zvuka (2)

➤ Subjektivni osećaj jačine zvuka zavisi od:

⊕ nivoa zvuka

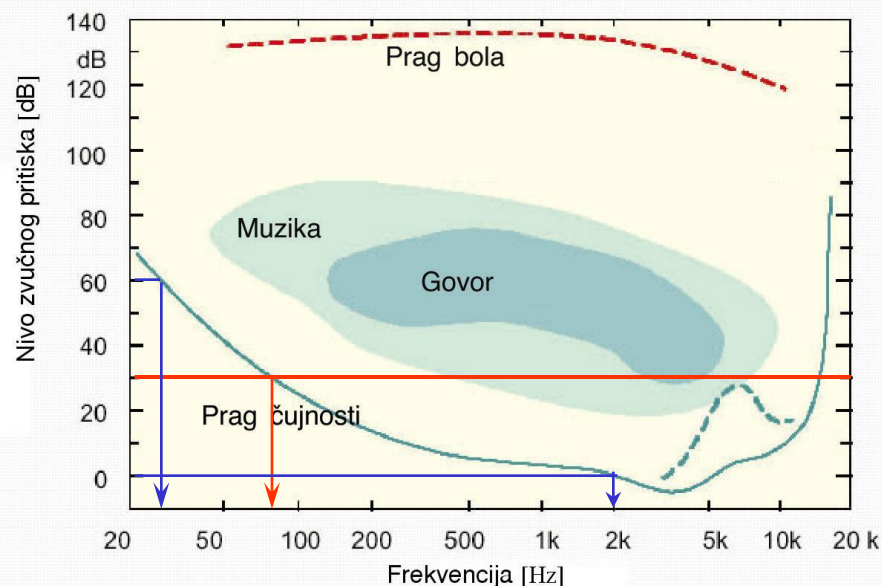
⊕ frekvencije

TAKO DA ...

➤ Dva zvuka istog nivoa, a različitih frekvencija, nemaju isti subjektivni osećaj.

➤ **Razlog:** Prag čujnosti kao i druge krive jednakih nivoa su frekvencijske zavisne.

Dinamičko - frekvencijski opseg čujnosti



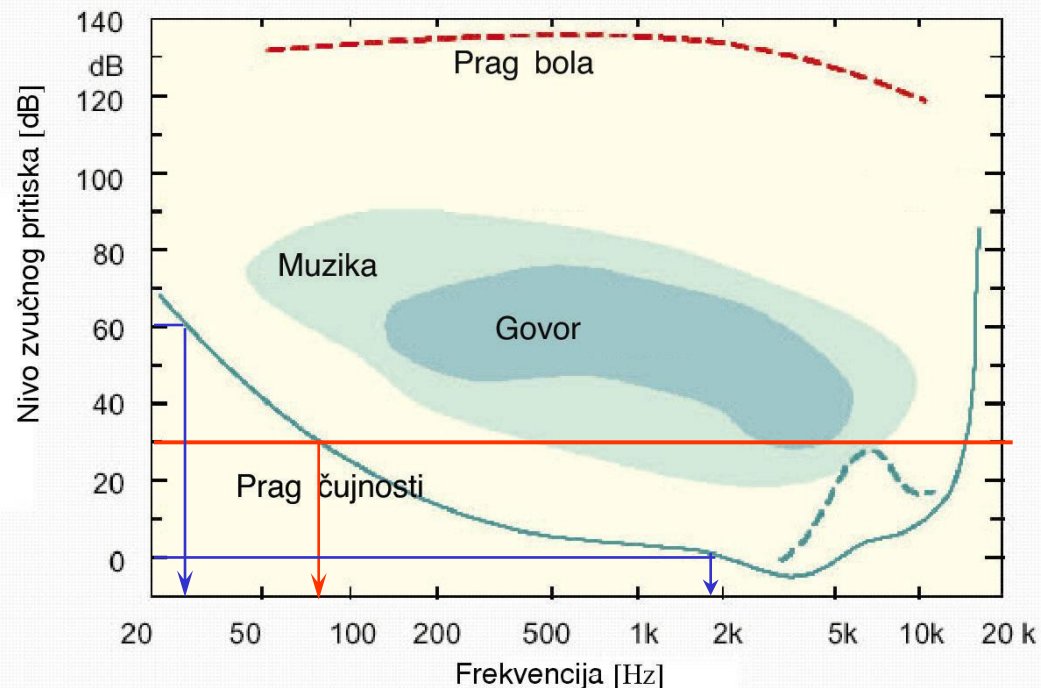
Subjektivna jačina zvuka (3)

Posledice:

- ▶ Objektivni nivo zvuka od 30dB neće se čuti ispod 80Hz, dok je iznad te frekvencije znatno iznad krive praga čujnosti.

- ▶ Prag čujnosti na 30Hz je za 60dB veći od praga čujnosti na 2kHz.

Dinamičko - frekvencijski opseg čujnosti



Subjektivna jačina zvuka (4)

- ▶ Za izražavanje subjektivnog osećaja jačine zvuka uvedena je nova veličina - **subjektivna jačina zvuka Λ [fon]**.

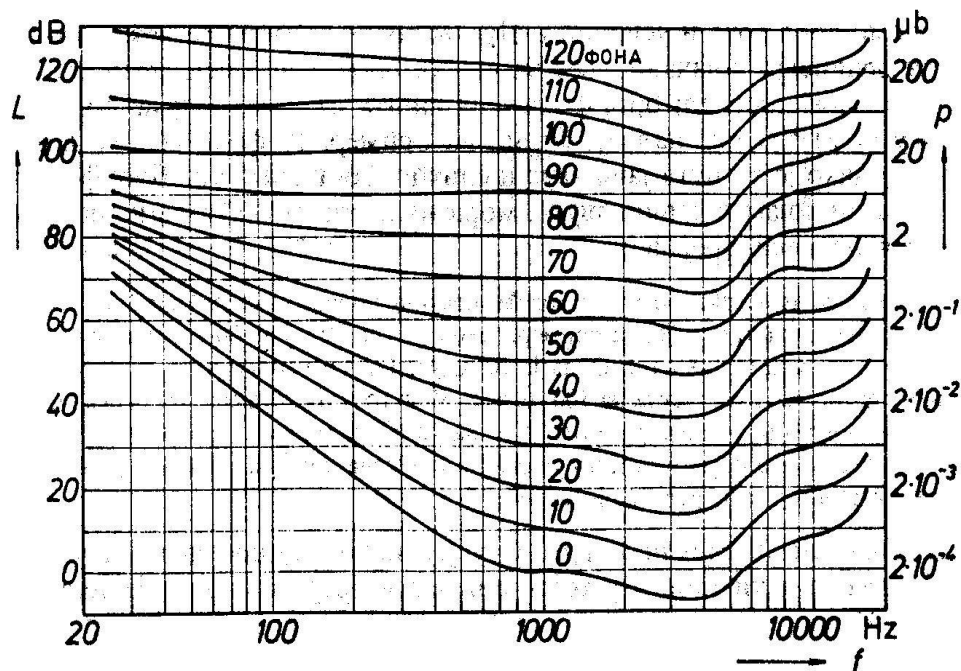
NIVO GLASNOSTI

- ▶ **OSOBINA:** Subjektivna jačina dva zvuka sa istim brojem fona identična za ljudsko uho.
- ▶ **USVOJENO:** Na 1000Hz subjektivna jačina zvuka ima istu vrednost kao objektivna jačina zvuka.

$$L[\text{fon}] = \Lambda[\text{fon}]$$

Subjektivna jačina zvuka (5)

- Za frekvencije iznad i ispod 1000Hz, fonska i decibelska skala nisu ekvivalentne.
- Subjektivna jačina zvuka u fonima određuje se eksperimentalno, promenom nivoa zvuka odgovarajućeg tona sve dok subjektivna ocena njegove jačine ne bude ista sa subjektivnom jačinom tona na 1000Hz.
- Na taj način dobijene su izofonske linije - **linije sa istim brojem fona bez obzira na frekvenciju.**
- Pomoću izofonskih linija se može naći veza između objektivne i subjektivne jačine, odnosno fona i decibela i obrnuto.



Izofonske linije po Flečeru i Mansonu

Subjektivna jačina zvuka (6)

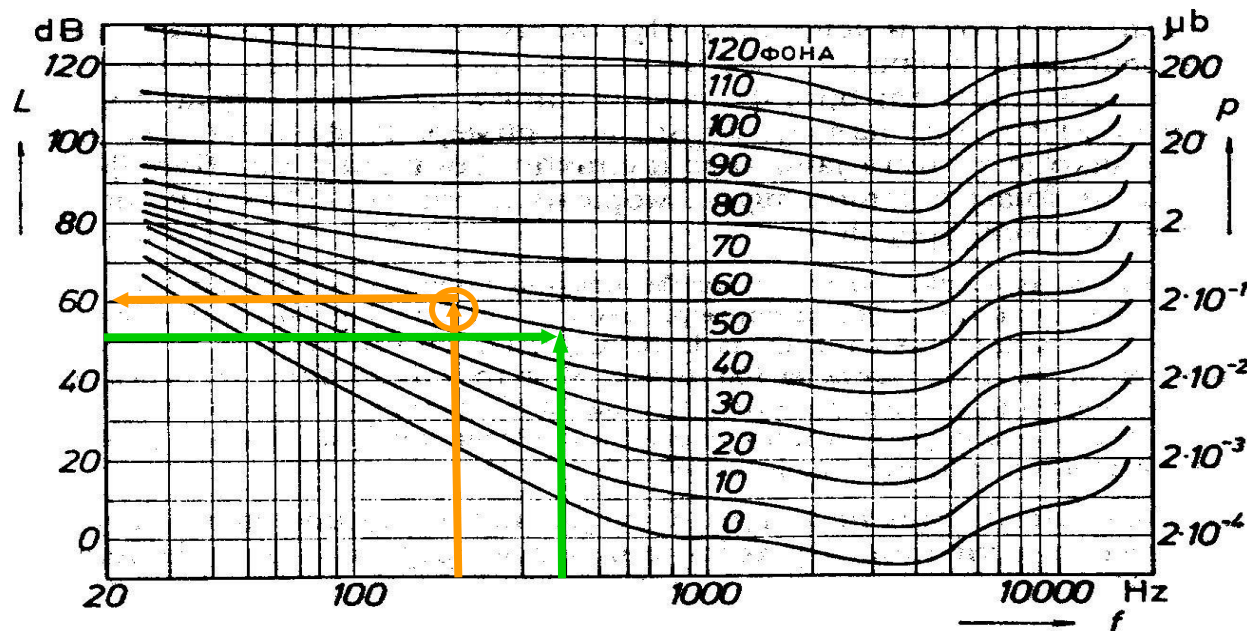
Primeri:

$L=50\text{dB}$, $f=400\text{Hz}$:

$\Lambda=46\text{fona}$

$\Lambda=60\text{fona}$, $f=200\text{Hz}$:

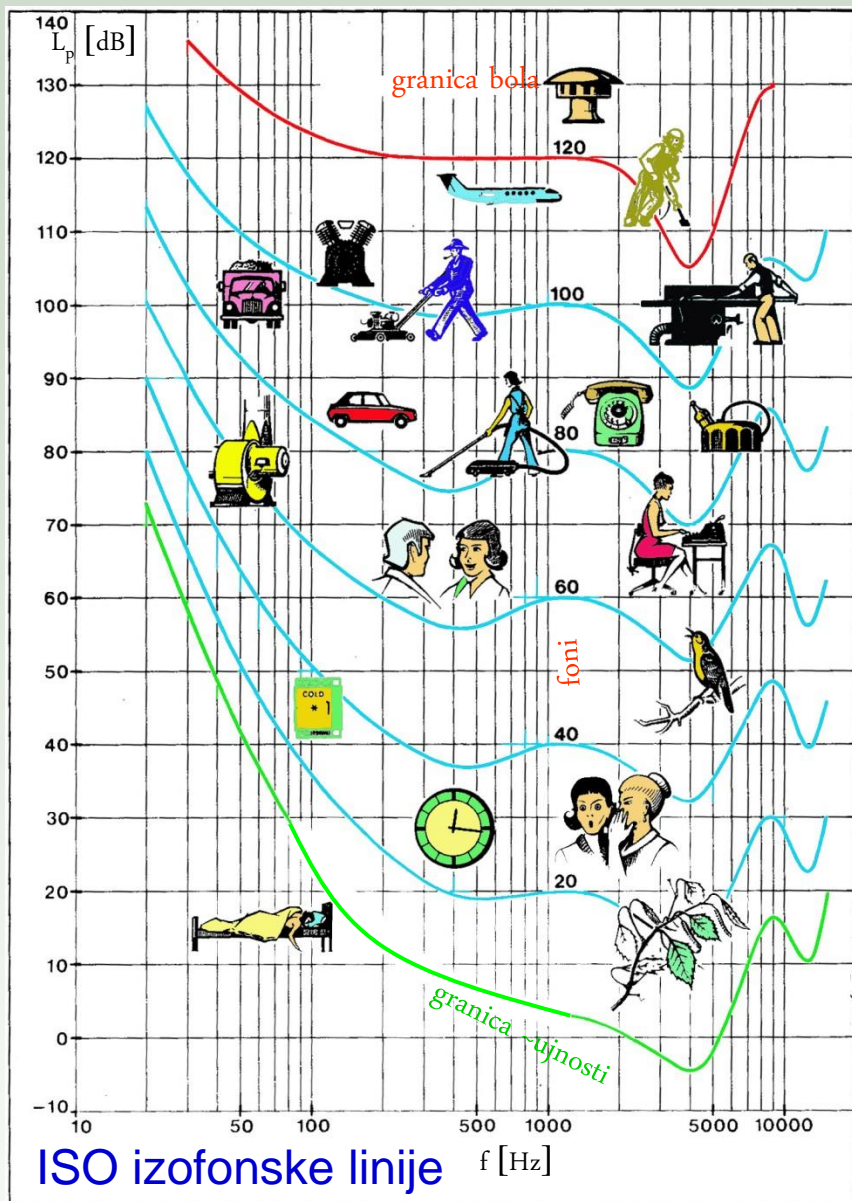
$L=64\text{dB}$



Izofonske linije po Flečeru i Mansonu

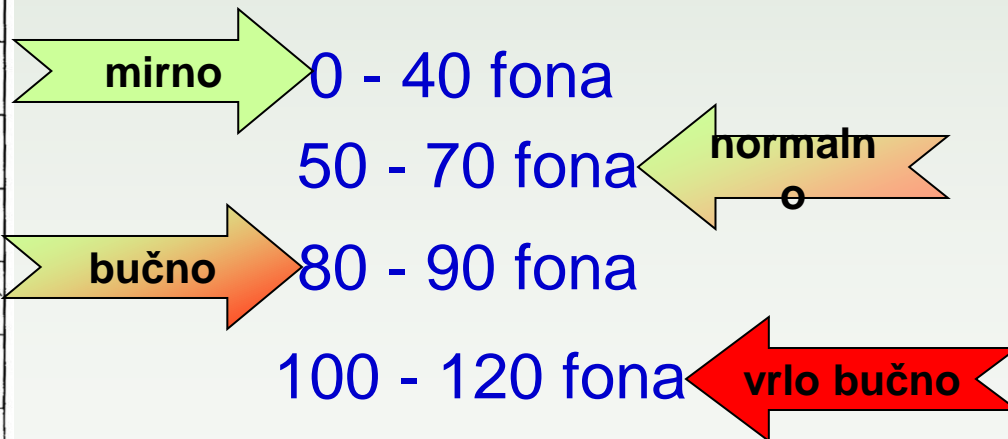
- ▶ Izofonske linije su u većem delu frekvencijskog opsega ekvidistantne (međusobno rastojanje krivih jednako) što ukazuje na logaritamski karakter jedinice fon. **Pojačanje za jednak broj fona uvek se ocenjuje jednako**, kao što je slučaj i kod dB skale.

Subjektivna jačina zvuka (7)



➤ Međunarodna organizacija za standardizaciju korigovala je izofonske linije po Flečeru i Mansonu i preporučuje nešto drugačije krive prikazane na slici.

➤ Subjektivna jačina se može gradirati prema sledećoj skali:

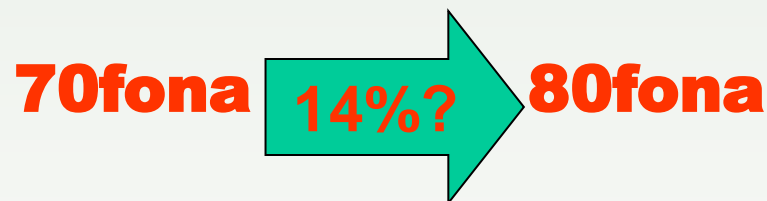


Glasnost zvuka (1)

- ▶ Primena fonske skale i veličine subjektivne jačine zvuka ne omogućuje da se izvrši subjektivna gradacija jačine zvuka tako da nam ne može ilustrovati kako ljudsko uho razlikuje različite jačine zvuka.

TRAGANJE ZA ODGOVORIMA NA PITANJA

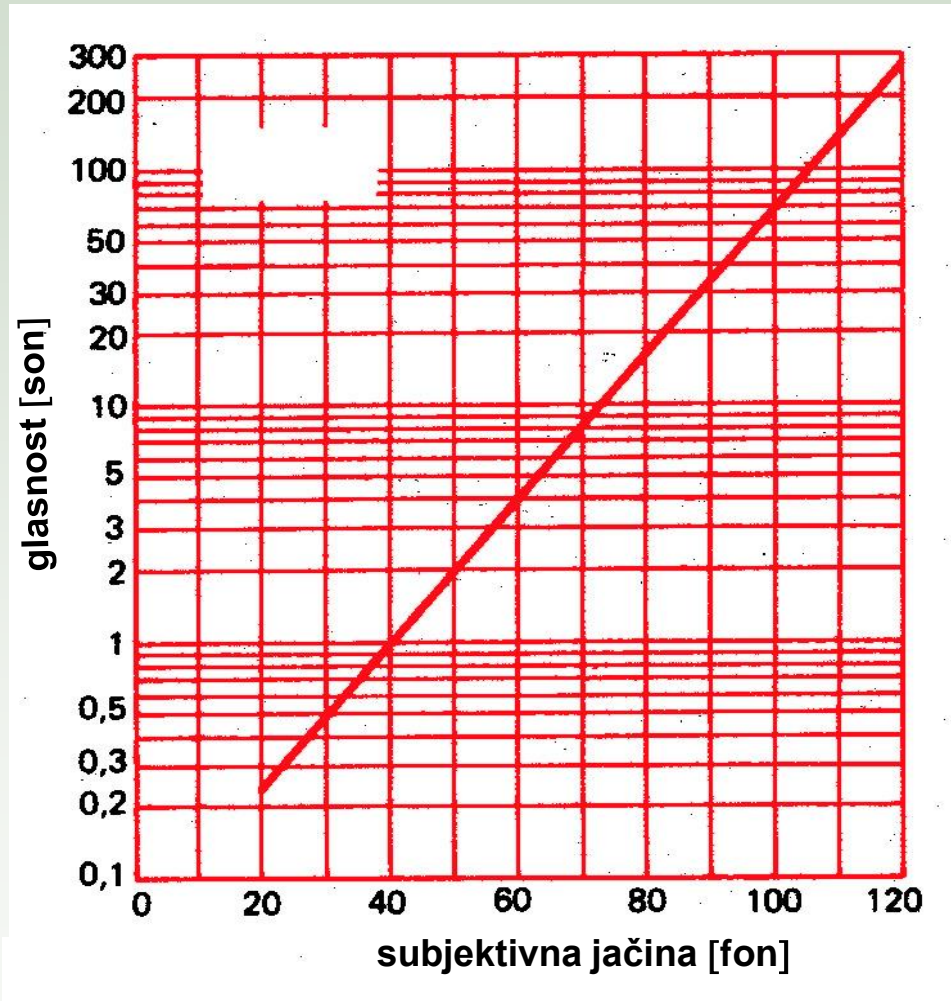
- ⊕ Da li je promena subjektivne jačine od X fona mala ili velika?
- ⊕ Koliko puta se subjektivno povećala jačina zvuka?



Glasnost zvuka (2)

- ▶ Odgovore na postavljena pitanja daje sonska skala, odnosno veličina **glasnost zvuka**, sa jedinicom **son**.
- ▶ Glasnost zvuka definiše koliko je neki zvuk glasniji od zvuka čija je glasnost 1son.
- ▶ Pomoću sonske skale može se izvršiti gradacija glasnosti zvuka:

Zvuk koji ima 8sona je dvostruko glasniji od zvuka čija je glasnost 4sona.



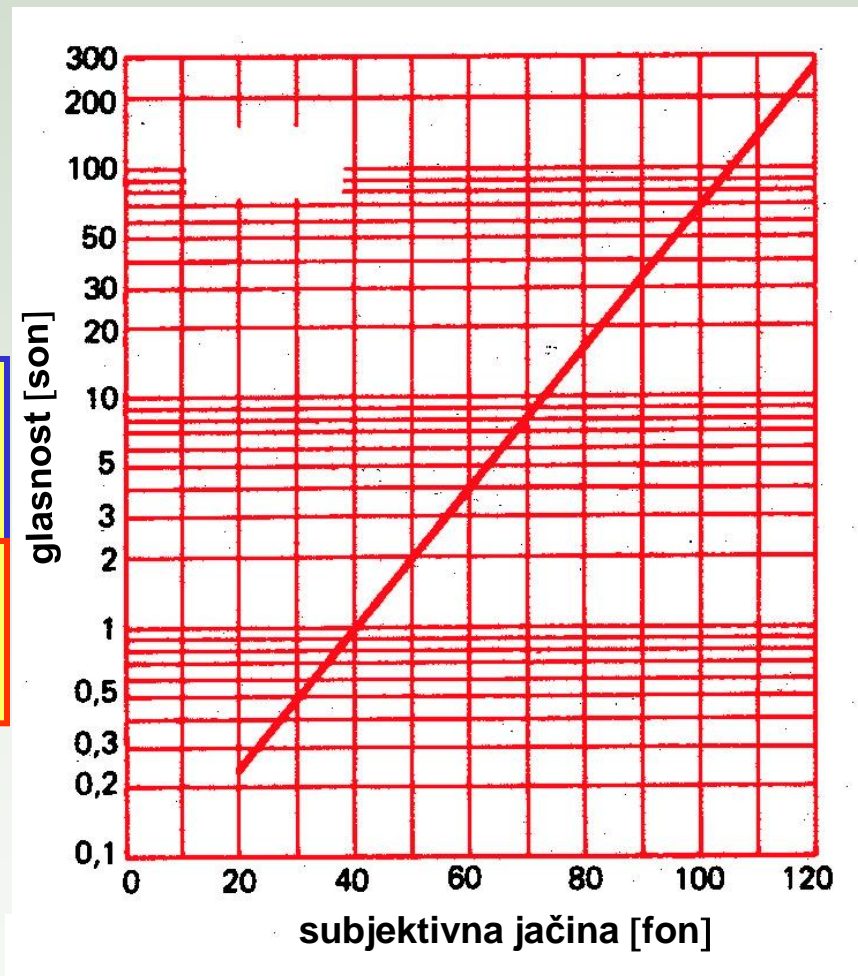
Glasnost zvuka (3)

- ▶ Svako povećanje subjektivne jačine od 10 fona udvostručuje glasnost.
- ▶ Subjektivnoj jačini od 40 fona odgovara glasnost od 1 sona.

$$S = 2^{\frac{\Lambda - 40}{10}}$$

$$\Lambda = 40 + \frac{10}{\log 2} \log S = 40 + 33 \log S$$

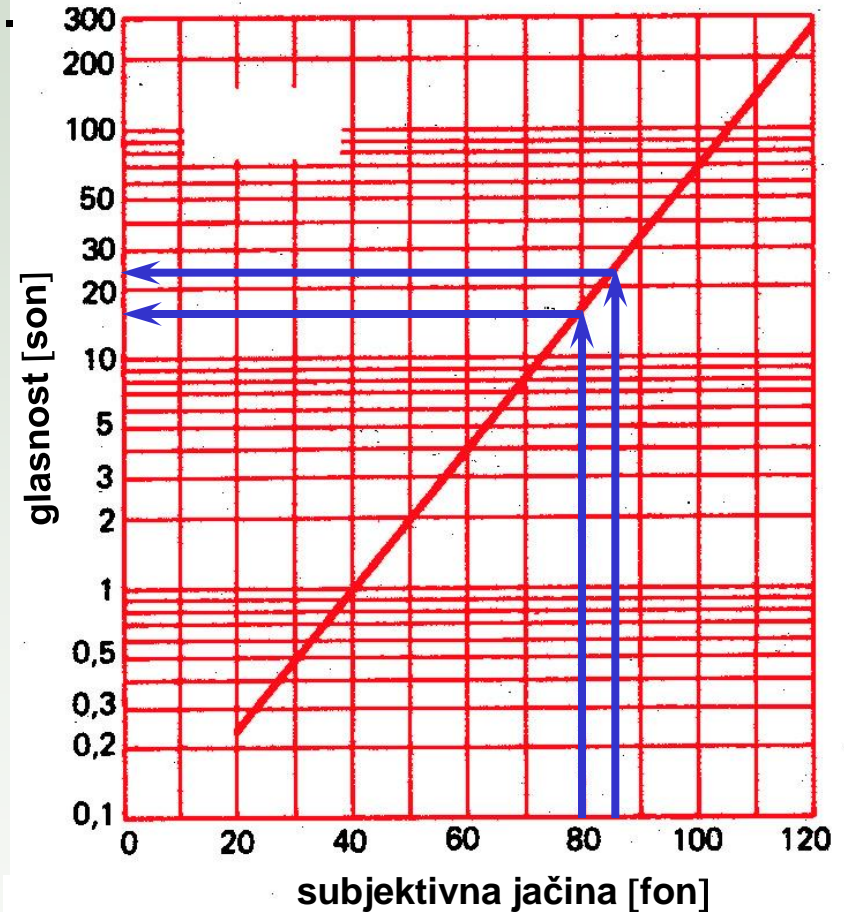
NIVO GLASNOSTI



Glasnost zvuka (4)

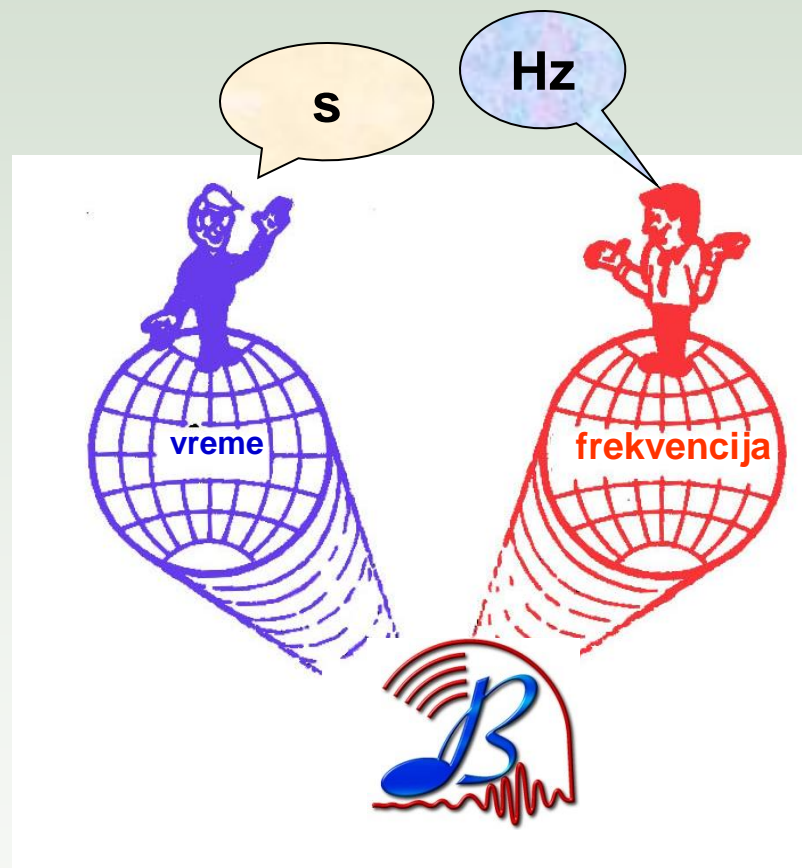
Primer: Ako motocikl proizvodi zvuk u srednje frekventnom opsegu subjektivne jačine 80fona, četiri takva motocikla stvaraće subjektivnu jačinu od 86fona. Porast jačine iznosi 7.5%.

Analiza preko glasnosti pokazuje da je glasnost u prvom slučaju 16 sona a u drugom 24 sona, tako da porast jačine stvarno iznosi 50%.



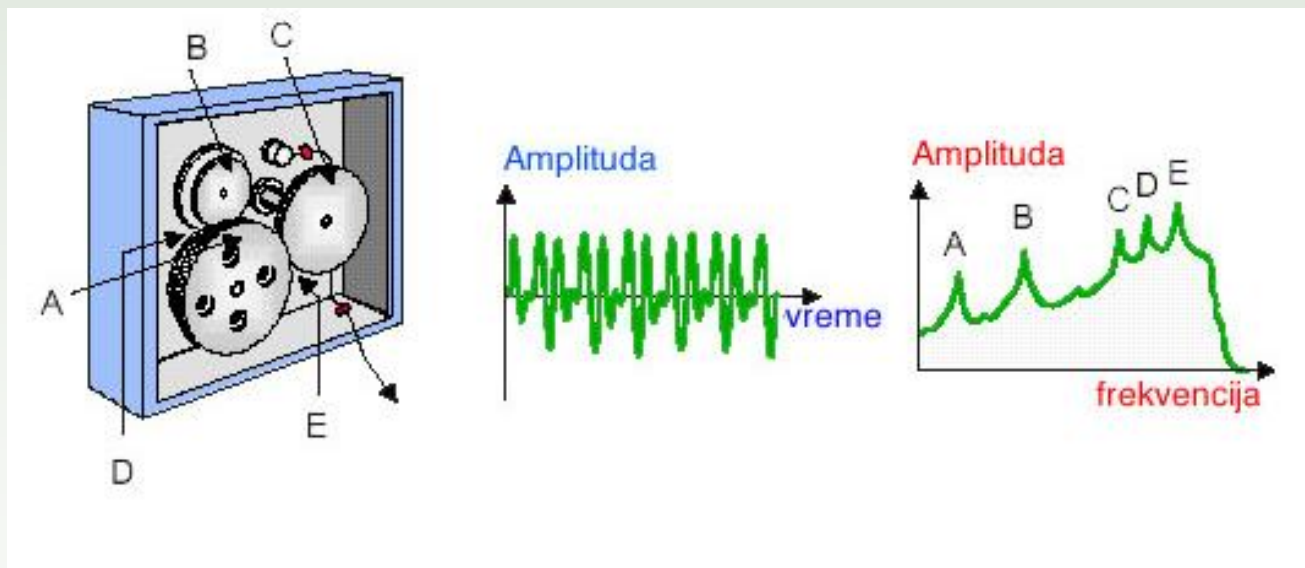
Frekvencijska analiza zvuka (1)

- ▶ Analizom zvuka u vremenskom domenu dobija se informacija o intervalima pojavljivanja i trajanju pojedinih događaja u sekundama, minutima, časovima, itd.
- ▶ Analizom zvuka u frekvencijskom domenu dobija se informacija o učestanosti pojavljivanja pojedinih događaja u [Hz], broj događaja u sekundi.



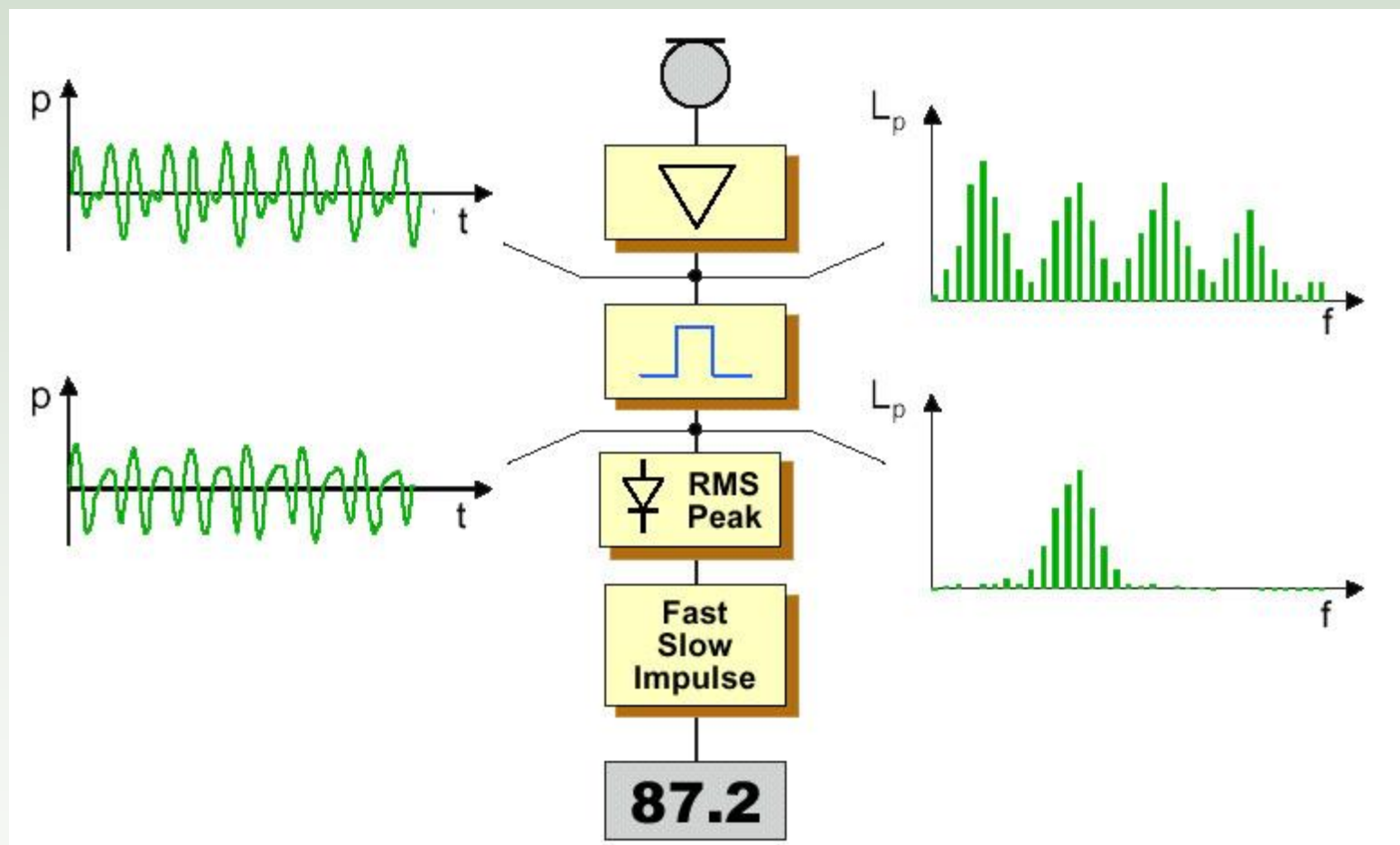
Frekvencijska analiza zvuka (2)

- Cilj frekvencijske analize je određivanje nivoa komponenti složenog signala na različitim frekvencijama, čime se dobija frekvencijski spektar signala.
- Poznavanje frekvencijskog spektra koji (u mnogim slučajevima) daje detaljnije informacije o samom izvoru zvuka omogućava povezivanje odgovarajućih komponenti spektra sa pojedinim elementima izvora čime se može identifikovati dominantni izvor zvuka



Frekvencijska analiza zvuka (3)

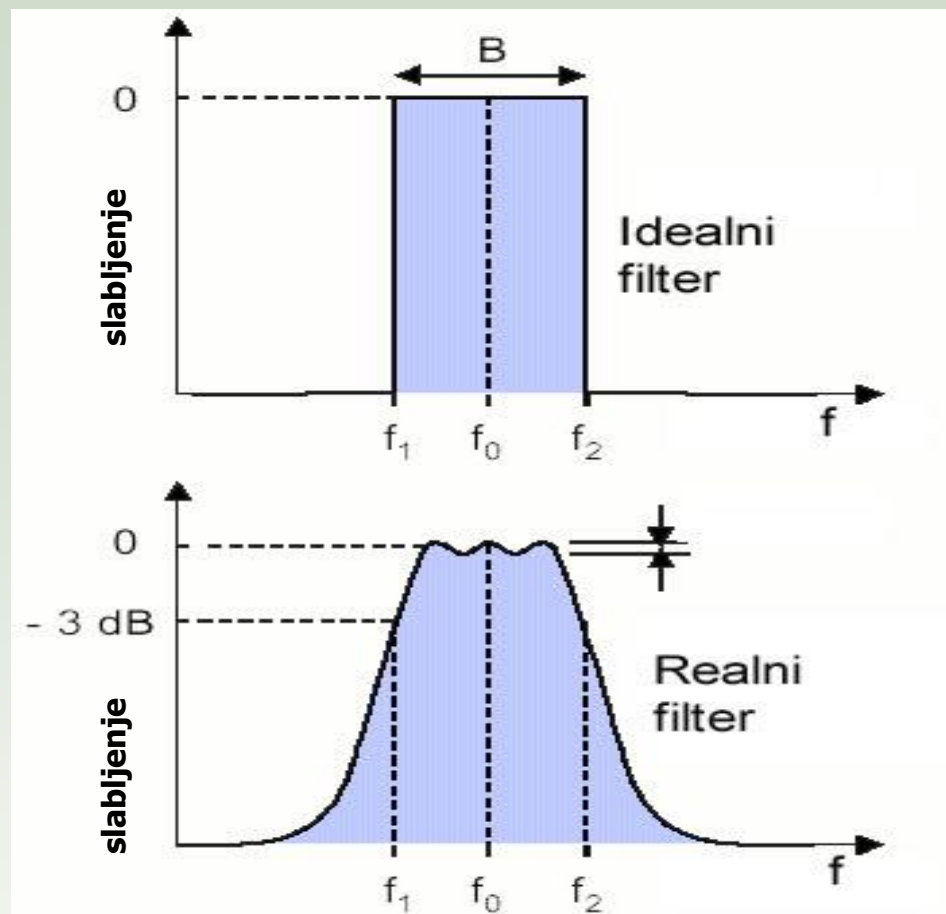
- ▶ Za frekvencijsku analizu akustičkih signala koriste se uglavnom pojasni filtri, tj. filtri koji propuštaju samo deo frekvencijskog opsega signala.



Frekvencijska analiza zvuka (4)

- Idealni filter propusnik opsega frekvencija propušta bez slabljenja deo frekvencijskog opsega signala unutar propusnog opsega filtera B:

$$B = f_2 - f_1$$

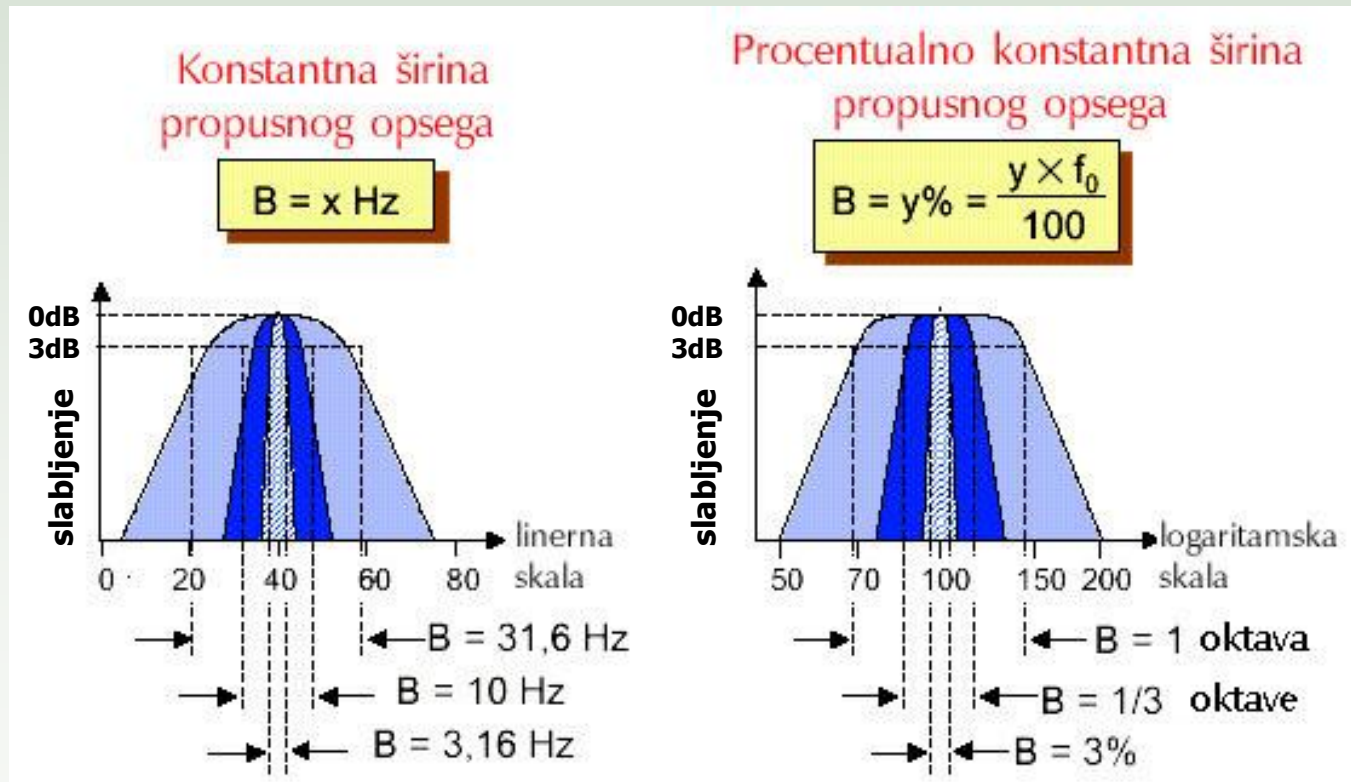


- Realni filter propušta i frekvencije van propusnog opsega, ali su amplitude tih komponenti dosta oslabljenje. Što je frekvencija dalja od propusnog opsega slabljenje je veće.

Frekvencijska analiza zvuka (5)

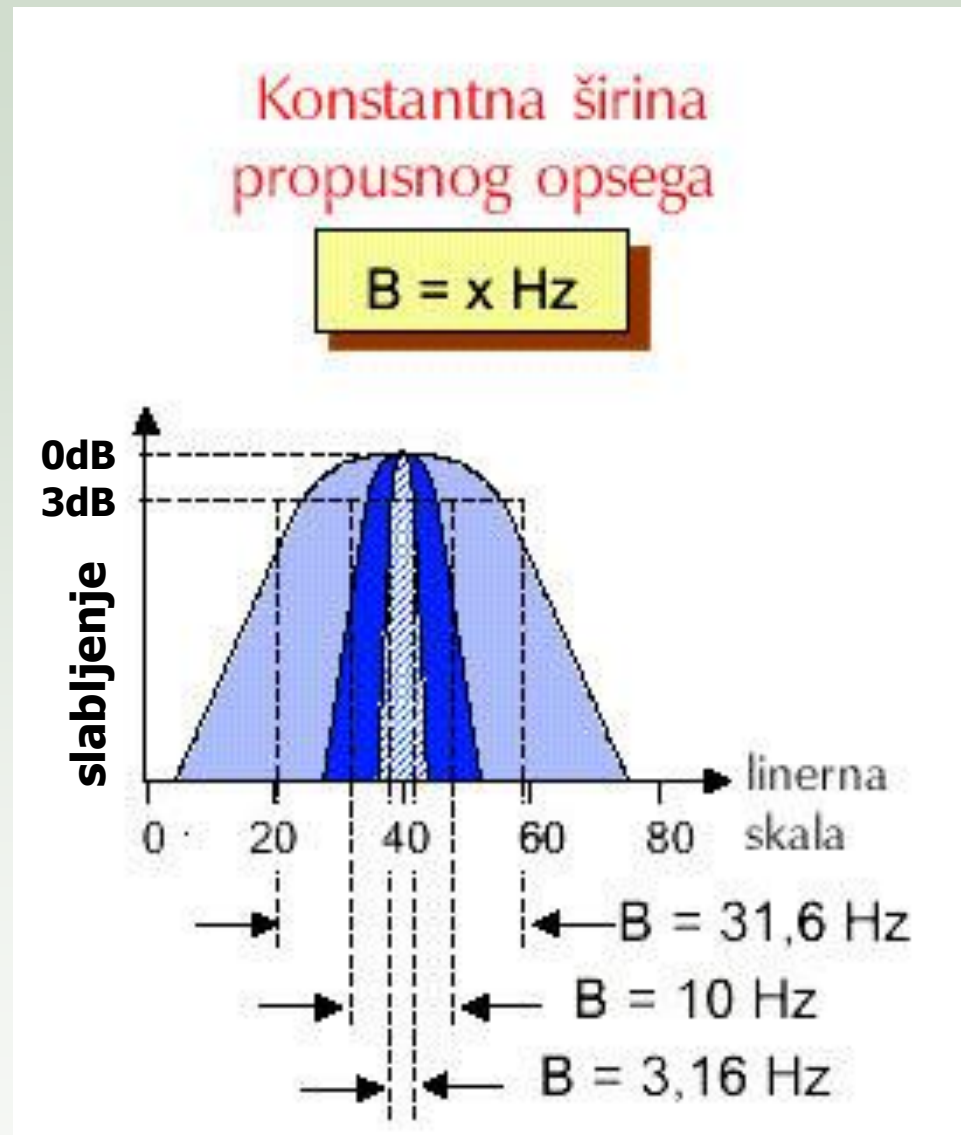
► Koriste se dva tipa pojasnih filtera:

- CB filteri
- CPB filteri



Frekvencijska analiza zvuka (6)

CB filteri – filteri sa konstantnom širinom propusnog opsega, nezavisnom od centralne frekvencije filtera.

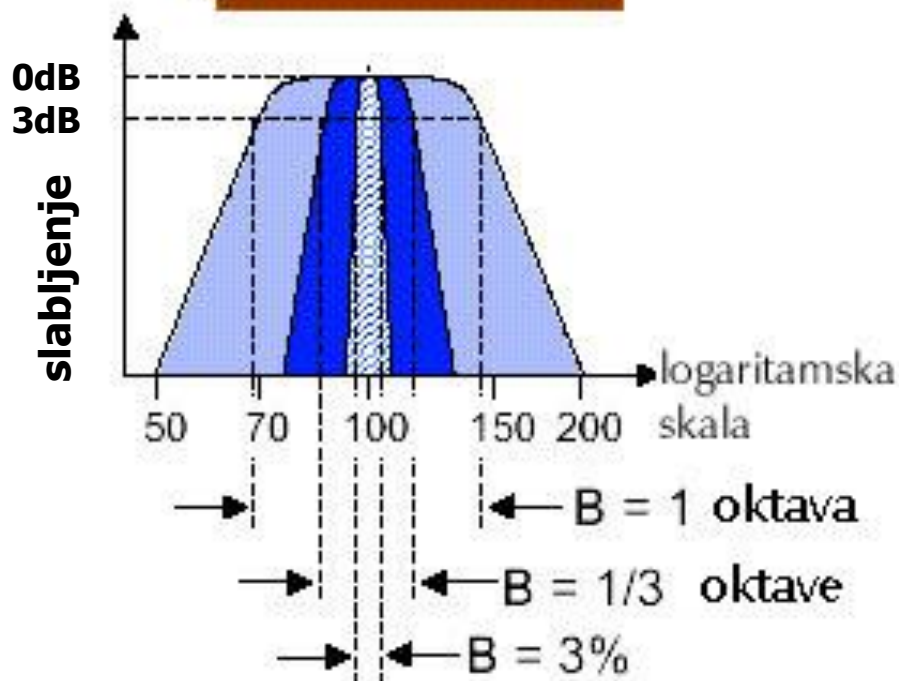


Frekvencijska analiza zvuka (7)

CPB filteri – filteri sa procentualno konstantnom širinom propusnog opsega, definisanom određenim procentom centralne frekvencije. Širina propusnog opsega se povećava sa povećanjem centralne frekvencije.

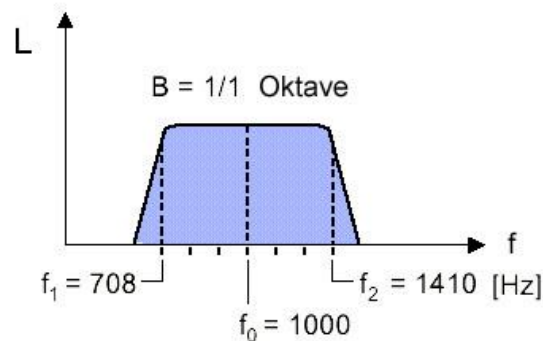
Procentualno konstantna širina propusnog opsega

$$B = y\% = \frac{y \times f_0}{100}$$



Frekvencijska analiza zvuka (8)

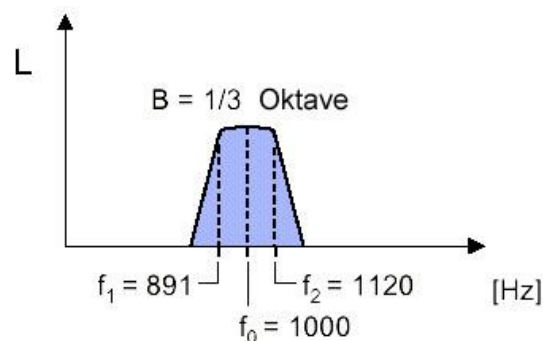
- ▶ Za frekvencijsku analizu akustičkih veličina najčešće se koriste oktavni i terčni (1/3 oktave) filtri.
- ▶ Oktavni filter je pojasni filter sa najširim propusnim opsegom, širine 70% centralne frekvencije.
- ▶ Širina propusnog opsega tercnog filtra odgovara 1/3 širine propusnog opsega oktavnog filtra, odnosno 23% centralne frekvencije.



1/1 OKTAVE

$$f_2 = 2 \times f_1$$

$$B = 0.7 \times f_0 \approx 70\%$$



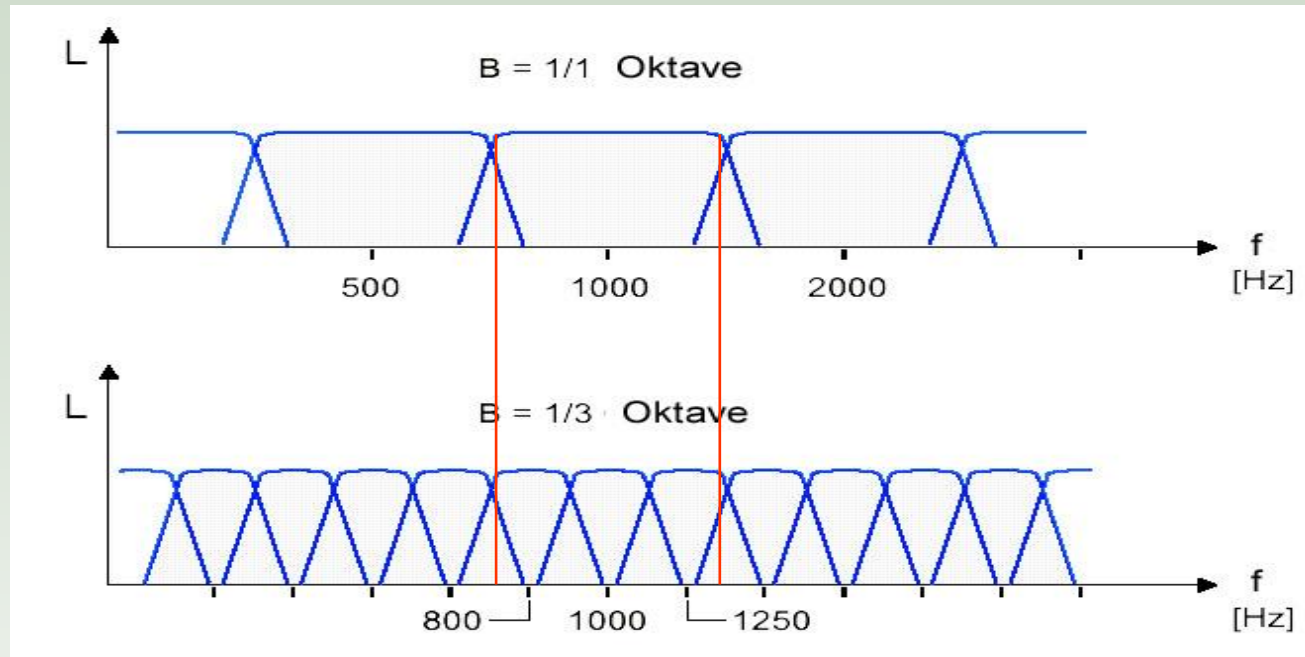
1/3 OKTAVE

$$f_2 = \sqrt[3]{2} \times f_1 = 1.25 \times f_1$$

$$B = 0.23 \times f_0 \approx 23\%$$

Frekvencijska analiza zvuka (9)

► Tri susedna tercna filtra daju jedan oktavni filter.



OKTAVNA ANALIZA

63,125,250,500,1k,2k,4k,8k Hz

Subjektivna jačina složenog zvuka (1)

► Pri određivanju subjektivne jačine složenog zvuka treba imati na umu sledeću činjenicu: **Uvo registruje jednaku glasnost bez obzira na frekvencijski karakter zvuka koji pobuđuje bazilarnu membranu na širini jedne radne grupe – barka.**

Posledica: Uskopojasni zvuk sa spektrom koji pokriva frekvencijski opseg jednog barka ili prost ton na centralnoj frekvenciji frekvencijskog opsega istog barka, jednake efektivne vrednosti zvučnog pritiska, uvo registruje kao jednaku glasnost zvuka.

Razlog: Za zvuk uskog spektra sve komponente složenog zvuka pobuđuju praktično isti deo bazilarne membrane, pa se složeni zvuk može tretirati kao prost ton čija je efektivna vrednost zvučnog pritiska:


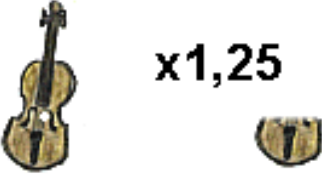
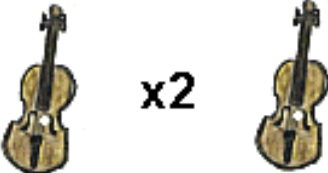


$$p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2}$$

odnosno efektivna vrednost intenziteta zvuka:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

gde su: p_1, p_2, \dots, p_n efektivne vrednosti zvučnog pritiska i intenziteta
 I_1, I_2, \dots, I_n zvuka komponenti složenog zvuka

Subjektivna jačina složenog zvuka (2)

osećaj glasnoće	promena nivoa	broj jednakih izvora	promena pritiska
osnovna glasnost	- -	 x1	× 1
jedva glasnije	+1 dB	 x1,25	×1,1
čujno glasnije	+3 dB	 x2	×1,4
dvostruko glasnije	+10 dB	 x10	×3
4 × glasnije	+20 dB	 x100	×10

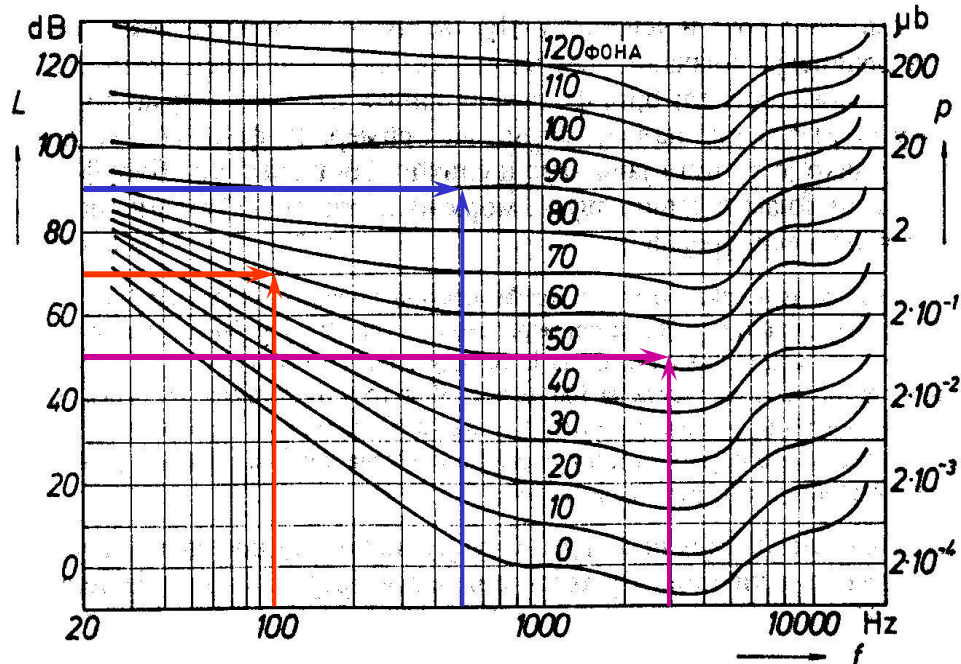
Subjektivna jačina složenog zvuka (3)

➤ Komponente složenog zvuka vrlo različitih frekvencija. Rastojanje komponenti na frekvencijskoj skali do 500Hz veće je od širine oktave, a iznad 500Hz veće od širine terce. Komponente pobuđuju različite grupe osjetljivih ćelija bazilarne membrane. U tom slučaju, potrebno je za svaku komponentu posebno naći glasnost zvuka, odrediti rezultujuću glasnost sabiranjem svih sone i ponovo pretvoriti sone u fone kako bi se dobila subjektivna jačina složenog zvuka.

f[Hz]	100	500	2000
L[dB]	70	90	50
Λ [fon]	60	90	52
S[son]	4	32	2.3

$$\Sigma S = 38.3 \text{ [son]}$$

$$\Lambda = 40 + 33 \log \Sigma S = 92.2 \text{ [fon]}$$

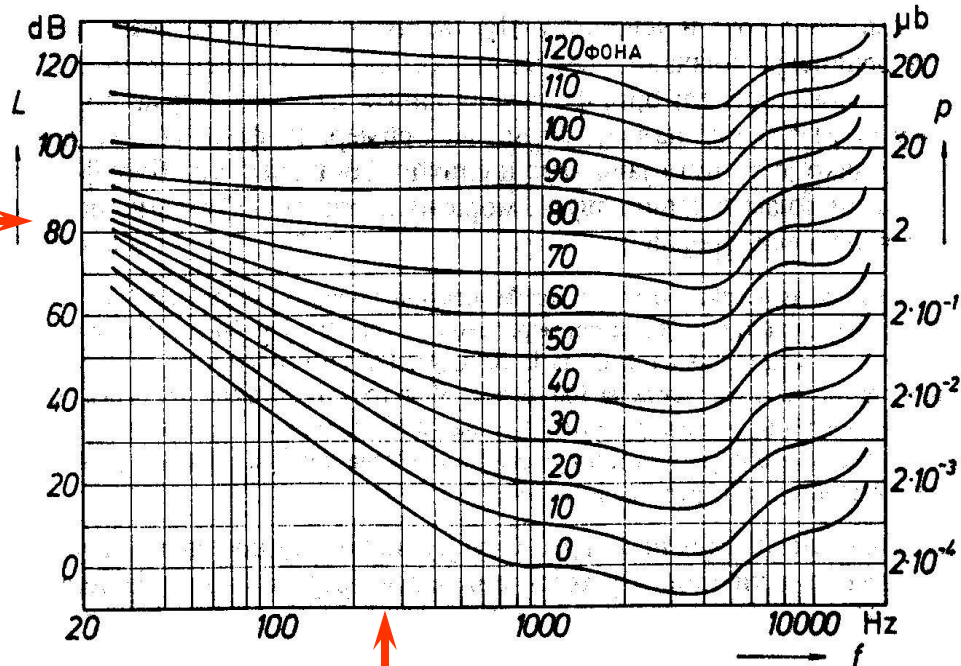
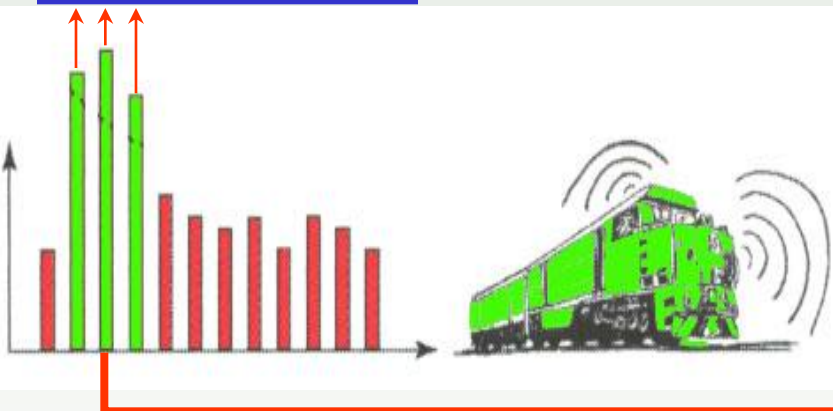


Subjektivna jačina složenog zvuka (4)

➤ **Složeni zvuk vrlo uskog spektra.** Komponente složenog zvuka pobuđuju praktično isti deo bazilarne membrane, pa se takav zvuk može posmatrati kao sinusoidalan. U tom slučaju potrebno je sabrati intenzitete svih komponenti, i na osnovu rezultujućeg intenziteta, odnosno nivoa zvuka, sa dijagrama izofonskih linija odrediti jačinu zvuka u fonima za srednju frekvenciju posmatranog opsega. Dakle, ovakav postupak se može primeniti za frekvencije koje pripadaju istom oktavnom opsegu na niskim frekvencijama do 500Hz, ili istom tercnom opsegu na višim frekvencijama iznad 500Hz.

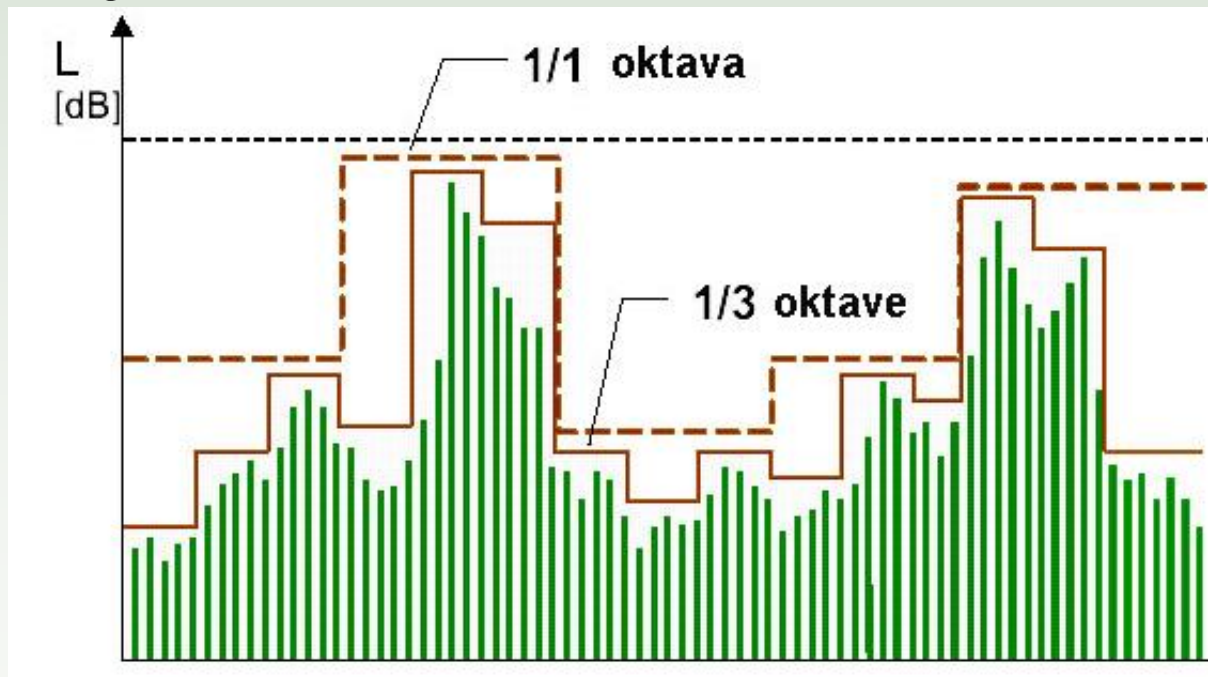
$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} [\text{dB}]$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$



Subjektivna jačina složenog zvuka (5)

- **Složeni zvuk širokog spektra.** Zvuk sadrži veoma veliki broj gusto raspoređenih komponenti koje pokrivaju široki opseg frekvencija. Dolazi do pobuđivanja više radnih grupa ćelija organa sluha, međusobnog preklapanja i maskiranja.
- Subjektivna jačina se određuje primenom **Stivensene metode**, polazeći od spektra složenog zvuka po tercama. Iz praktičnih razloga, subjektivna jačina se može odrediti na osnovu preračunatog ili izmerenog oktavnog spektra složenog zvuka.



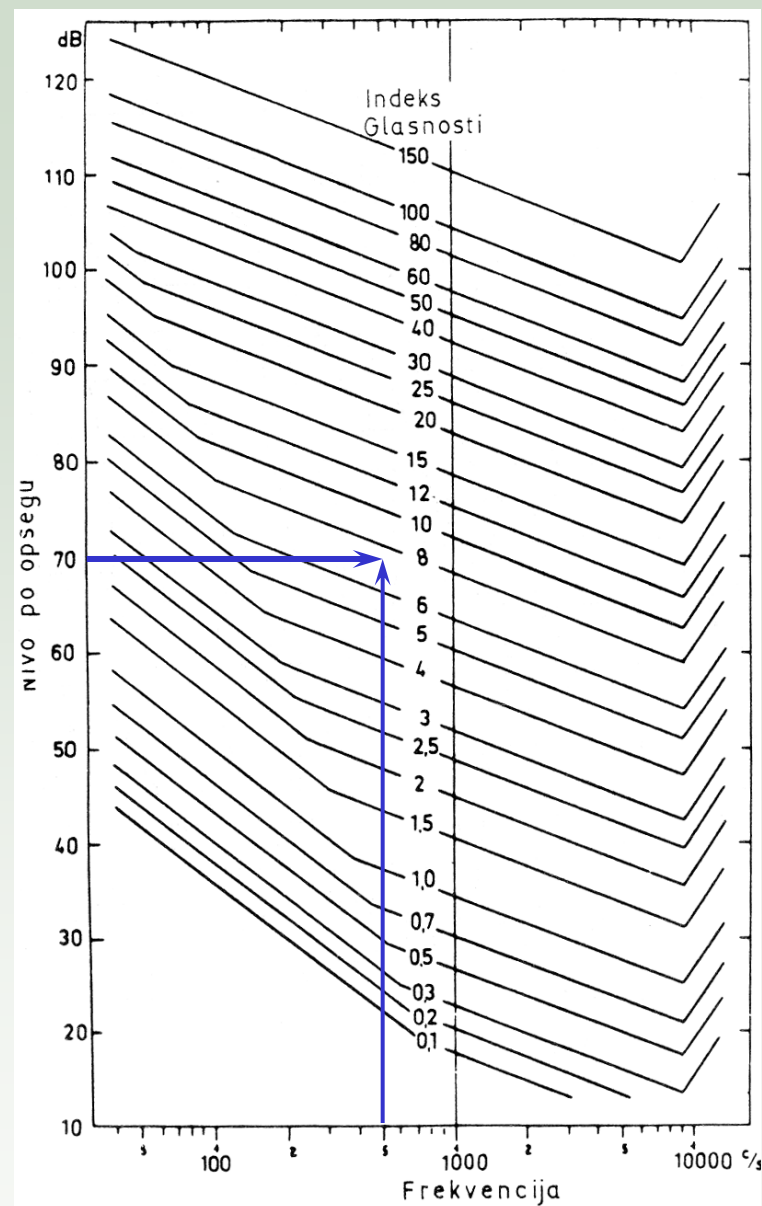
Subjektivna jačina složenog zvuka (6)

- Za svaku centralnu frekvenciju terce, na osnovu nivoa zvuka tercnog opsega, sa Stivensenovog dijagrama određuje se indeks glasnosti u sonima, S_i .
- Glasnost složenog zvuka, S , određuje se primenom formule kojom se daje određena prednost terci sa najvećim indeksom glasnošću, S_{max} :

$$S = S_{max} + F \left(\sum_i S_i - S_{max} \right)$$

- Koeficijent F uzima u obzir pojasnu širinu korišćenog filtra i efekata maskiranja. Ima vrednost 0.15 za terčni spektar složenog zvuka, a vrednost 0.3 za oktavni spektar složenog zvuka.
- Subjektivna jačina:

$$\Lambda = 40 + 33 \log S$$

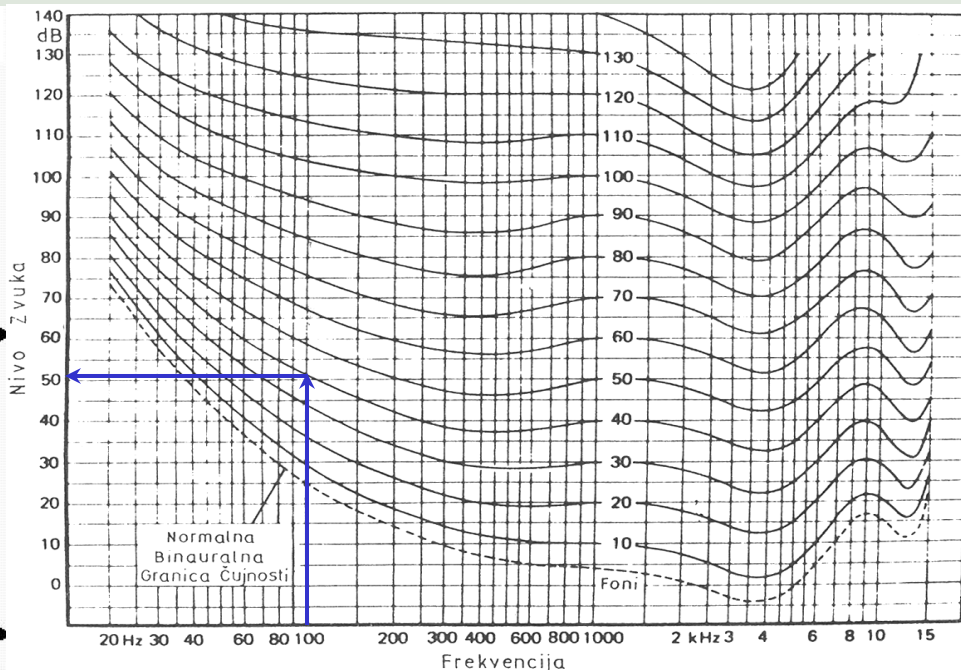
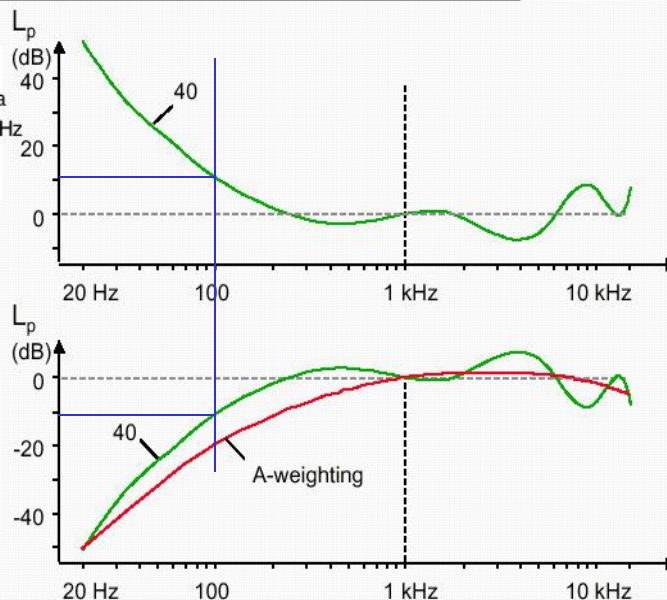


Težinske krive (1)

- Potreba za merenjem subjektivne jačine zvuka dovela je do uvođenja težinskih krivih.
- Da bi zvuk na 100Hz imao subjektivnu jačinu od 40fona taj zvuk mora da ima objektivni nivo od 51dB. Prema tome, da bi instrument umesto 51 pokazao 40 potrebno je uneti slabljenje od 11dB. To je upravo razlika između vrednosti izofonske linije od 40fona na 1000Hz i 100Hz. Ako se analogno primeni isti zaključak i za ostale frekvencije, frekvencijska karakteristika instrumenta bi trebalo da ima vrednost izvrnute izofonske linije od 40 fona normalizovane na nultu vrednost na 1000Hz da bi instrument pokazivo subjektivnu jačinu.

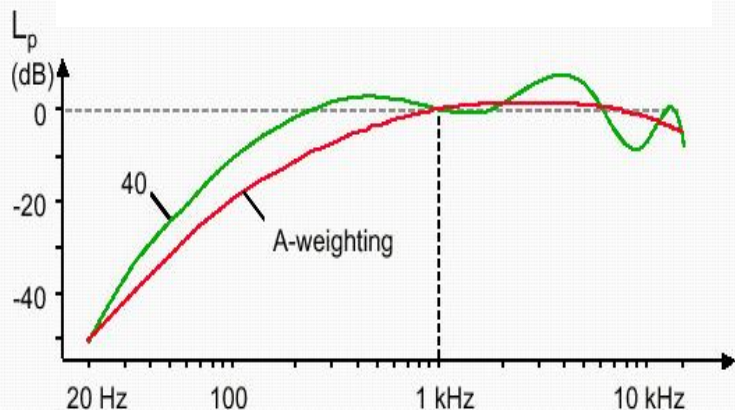
40dB izofonska linija i A-težinska kriva

- 40dB izofonska linija normalizovana na 0dB na $f=1000\text{Hz}$

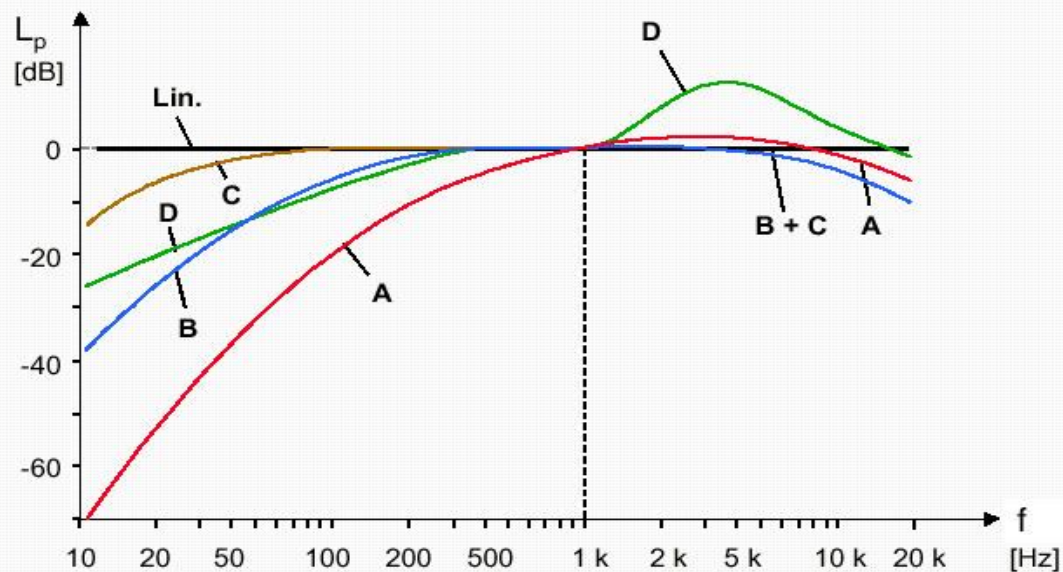


Težinske krive (2)

- ▶ Dakle, za svaku subjektivnu jačinu zvuka potrebno je imati drugu frekvencijsku karakteristiku, čime bi se instrument komplikovao. Zato su standardizovane tri frekvencijske karakteristike, A, B i C težinske krive, koje približno odgovaraju izvrnutim izofonskim linijama od 40, 70 i 100fona prethodno normalizovanim na nultu vrednost na 1000Hz.
- ▶ **Težinska kriva** predstavlja frekvencijsku karakteristiku koja daje pojedinim frekvencijama veći ili manji značaj, odnosno “težinu”, usklađujući time reakciju instrumenta sa osetljivošću organa sluha na zvuk (izofonskim linijama).
- ▶ Za ocenu i merenje avionske buke uvedena je D-težinska kriva, koja dodatno pojačava opseg od 1÷10kHz.



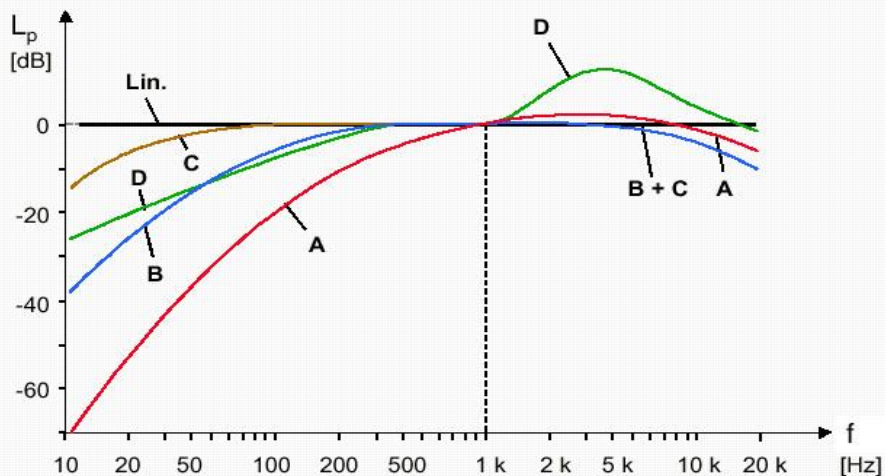
Težinske krive



Težinske krive (3)

► Slabljenje težinskih krivi

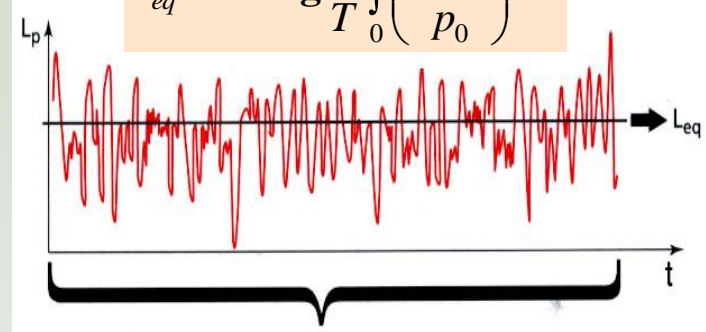
Težinske krive

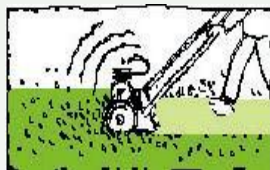
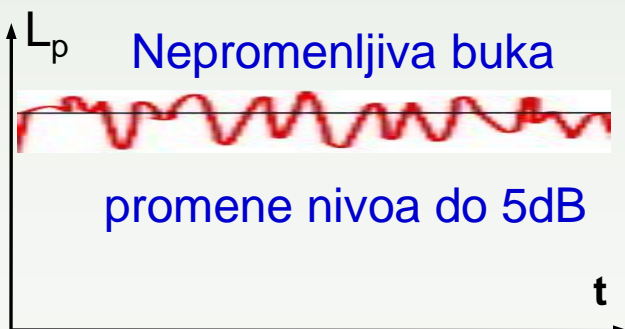


f [Hz]	Kriva A [dB]	Kriva B [dB]	Kriva C [dB]
50	-30.2	-11.6	-1.3
63	-26.2	-9.3	-0.8
80	-22.5	-7.4	-0.5
100	-19.1	-5.6	-0.3
125	-16.1	-4.2	-0.2
160	-13.4	-3.0	-0.1
200	-10.9	-2.0	0
250	-8.6	-1.8	0
315	-6.6	-0.8	0
400	-4.8	-0.5	0
500	-3.2	-0.3	0
630	-1.9	-0.1	0
800	-0.8	0	0
1000	0	0	0
1250	0.6	0	0
1600	1.0	0	-0.1
2000	1.2	-0.1	-0.2
2500	1.3	-0.2	-0.3
3150	1.2	-0.4	-0.5
4000	1.0	-0.7	-0.8
5000	0.5	-1.2	-1.3
6300	-0.1	-1.9	-2.0
8000	-1.1	-2.9	-3.0
10000	-2.5	-4.3	-4.4

Ekvivalentni nivo (1)

- U realnim uslovima čest je slučaj da je zvuk dugotrajan i da je nivo zvuka (buke) promenljiv sa vremenom (buka u industriji, saobraćajna buka, muzika).
- Da bi se procenjivao uticaj takvog zvuka na čoveka, ili komparirala izmerena vrednost nivoa sa dozvoljenom, uvedeno je jednobrojno izražavanje vremenski promenljivog zvuka pojmom - ekvivalentni nivo zvuka (buke), L_{eq} [dB(A)].
- Ekvivalentni nivo zvuka (buke) predstavlja konstantni (prosečni) nivo zvučnog pritiska, koji u određenom vremenskom intervalu ima istu zvučnu energiju kao posmatrani, vremenski promenljiv nivo zvučnog pritiska.

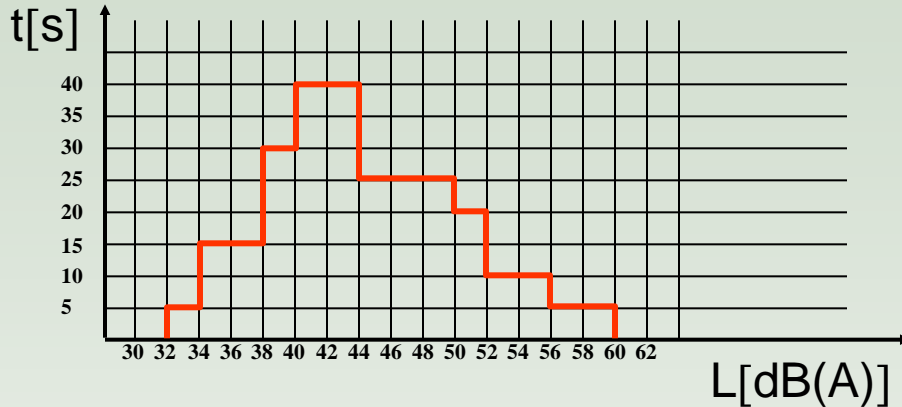
$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt$$

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_A(t)/10} dt \text{ [dB(A)]}$$



Ekvivalentni nivo (2)

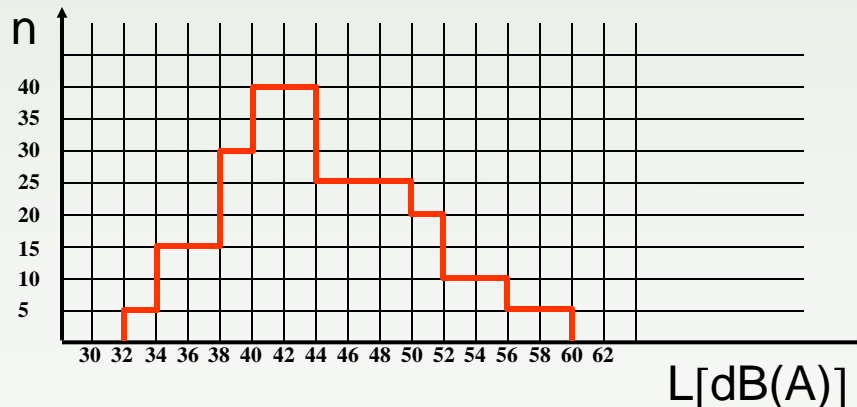
► Ekvivalentni nivo zvuka se može praktično odrediti:

- uzorkovanjem promenljivog nivoa zvuka i određivanjem vremena trajanja pojedinačnih nivoa promenljivog zvuka



$$L_{eq} = 10 \log \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{T} 10^{0.1L_i}$$

- uzorkovanjem promenljivog nivoa zvuka i klasiranjem pojedinačnih nivoa promenljivog zvuka prema nivou



$$L_{eq} = 10 \log \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{n} 10^{0.1L_i}$$

t_i - trajanje i-tog nivoa zvuka L_i
 T - ukupno vreme uzorkovanja
 n_i - broj uzoraka nivoa L_i
 n - ukupan broj uzoraka

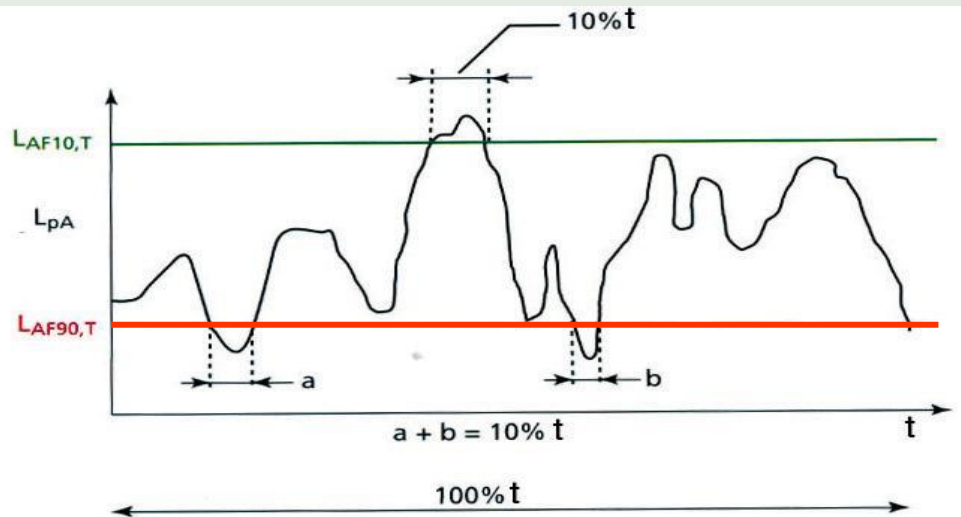
Ekvivalentni nivo (3)

- ▶ Izražavanjem vremenski promenljivog nivoa zvuka (buke) pomoću ekvivalentnog nivoa uspostavlja se veza sa **vremenom** kao parametrom koji u proceni štetnog dejstva zvuka (buke) izražava dužinu ekspozicije posmatranom nivou i **frekvencijom** korišćenjem A-težinske krive pri merenju promenljivog nivoa zvuka (buke).
- ▶ Statističkom analizom vremenski promenljivog zvuka u amplitudnom domenu, mogu se izračunati i procentualni nivoi L_n , koji predstavljaju nivoe koji su premašeni u $n\%$ ukupnog mernog vremena.

L_{10} [dB(A)] – nivo koji je premašen u 10% posmatranog vremenskog intervala

L_{50} [dB(A)] – nivo koji je premašen u 50% posmatranog vremenskog intervala

L_{90} [dB(A)] – nivo koji je premašen u 90% posmatranog vremenskog intervala



- ▶ Ako je verovatnoća raspodele nivoa približna Gausovoj tada važi relacija:

$$L_{eq} = L_{50} + \frac{L_{10} - L_{90}}{60}$$

SEL (1)

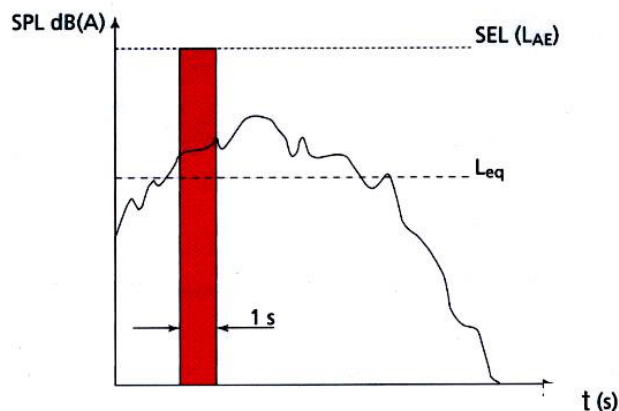
▶ ANALOGIJA



Strujomer ne pokazuje trenutnu potrošnju električne energije već nam omogućava da povremenim očitavanjem utvrdimo **ukupnu potrošenu energiju** u određenom periodu, što odgovara veličini **SEL**. Račun koji plaćamo ne zavisi od toga kako smo trošili energiju već koliko smo ukupno potrošili.

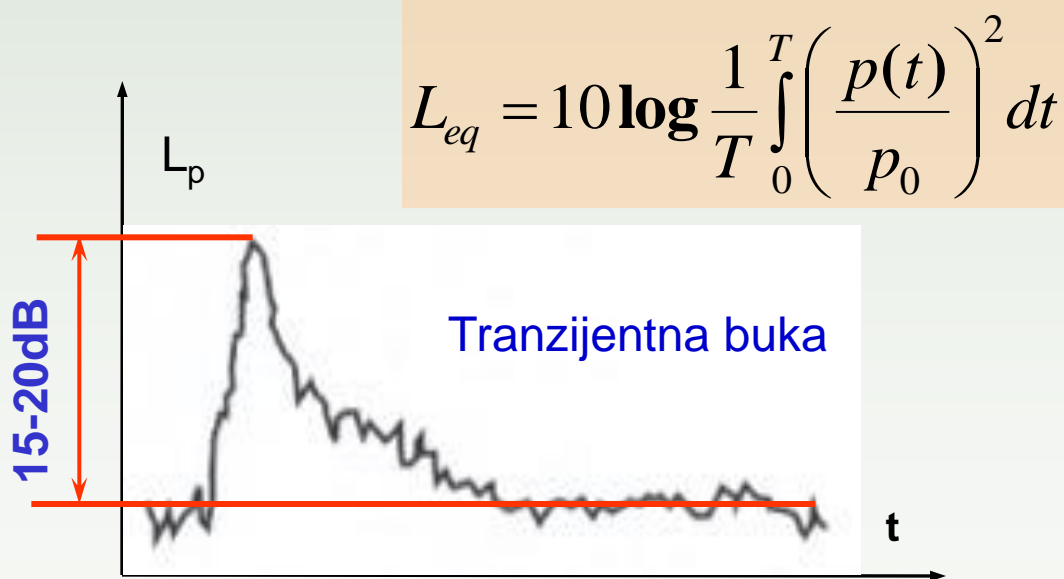
Ako ukupnu potrošenu energiju podelimo sa odgovarajućim vremenskim periodom dobićemo **prosečnu angažovanu električnu snagu** izvora, što odgovara veličini **Leq**. Sada možemo da znamo kako smo prosečno trošili energiju.

SEL opisuje ukupnu zvučnu energiju u posmatranom vremenskom intervalu, dok Leq opisuje vremenski usrednjenu vrednost zvučne energije – zvučnu snagu.



SEL (2)

- ▶ Zvučni događaji gde je razlika između maksimalnog i pozadinskog nivoa zvuka (buke) velika, predstavljaju tranzijentne (kratkotrajne) pojave. Na ukupnu zvučnu energiju, a samim tim i na L_{eq} , kao prosečnu zvučnu energiju, utiču samo najviši nivoi koji se od maksimalnog nivoa razlikuju 15÷20dB.
- ▶ Za tranzijentne (kratkotrajne) pojave, kao što su preleti aviona, prolazak automobila, eksplozije i sl., gde merenje počinje i završava u pozadinskoj buci, ekvivalentni nivo zavisi od mernog perioda, čak i ako je ukupna energija posmatrane pojave ista.



$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt$$



SEL (3)

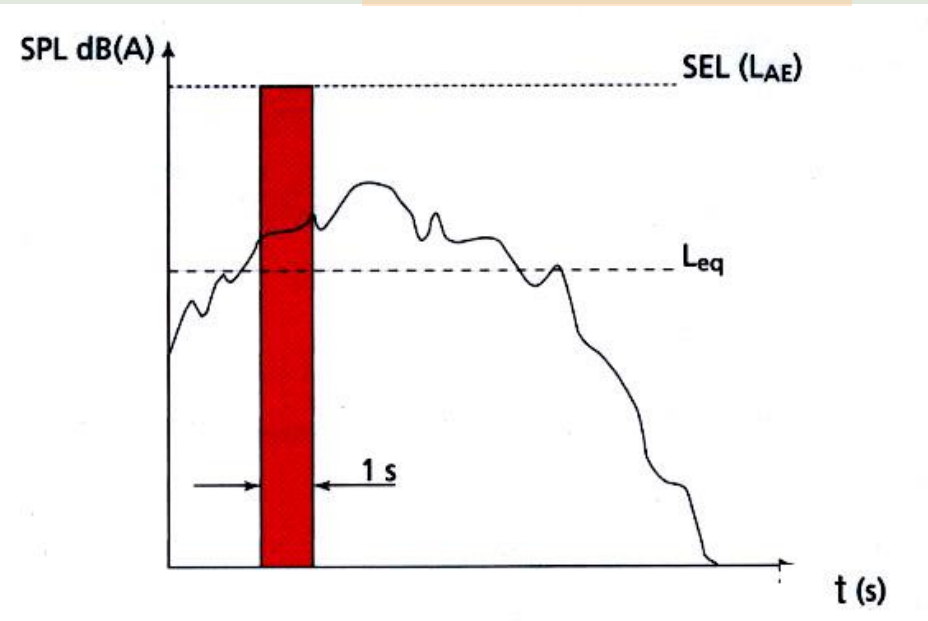
- Za tranzijentne pojave koristi se SEL (Sound Exposure Level - nivo izloženosti zvuku), koji eliminiše uticaj mernog perioda.

SEL se definiše kao konstantni nivo zvučnog pritiska koji ima istu energiju u jednoj sekundi kao i posmatrana pojava.

$$L_{AE} = 10 \log \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt [\text{dB(A)}], T_0 = 1\text{s}$$

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt$$

- Kao i kod ekvivalentnog nivoa, ukupna zvučna energija se računa za ukupni merni period, ali se umesto usrednjavanja u celom mernom periodu usrednjavanje vrši u toku referentnog vremena od 1s. SEL stoga definiše ukupnu zvučnu energiju, a ekvivalentni nivo vremenski usrednjenu zvučnu energiju – zvučnu snagu.



SEL (4)

➤ SEL se može primeniti za izračunavanje ekvivalentnog nivoa za dati period T ako su poznate pojedinačne vrednosti SEL-a za različite zvučne događaje, L_{AE} , koji se pojavljuju u tom periodu. Za samo jedan događaj u vremenskom intervalu T veza između SEL-a i L_{eq} je:

$$L_{eq} = L_{AE} - 10 \log \frac{T}{T_0}, T_0 = 1s$$

a za više događaja:

$$L_{eq} = 10 \log \sum_i 10^{0.1 L_{AEi}} - 10 \log \frac{T}{T_0}, T_0 = 1s$$

Primer:

Izračunati ekvivalentni nivo za osmočasovni period rada mašine koja u tom periodu ima 400 ciklusa rada operacija. SEL vrednost za svaki ciklus iznosi 105dB(A).

$$L_{eq} = 10 \log 400 \cdot 10^{105/10} - 10 \log \frac{8 \cdot 3600}{1}$$

$$L_{eq} = 10 \log 400 + 105 - 10 \log 28800$$

$$L_{eq} = 86.4 \text{dB(A)}$$