

**UNIVERZITET U BANJOJ LUCI
MAŠINSKI FAKULTET**

Dr Valentina Golubović - Bugarski

BUKA I VIBRACIJE
(Skripta – izvodi predavanja)

Banja Luka, septembar 2010.

UVOD U VIBRACIJE

("Introduction to shock and vibration", Bruel&Kjaer)

Rezime

U ovoj lekciji dat je uvod u vibracije preko opisa najčešće korištenih mehaničkih parametara kojim se opisuje kretanje jednostavnog mehaničkog sistema masa-opruga. Prikazani su različiti tipovi signala, konverzija između različitih parametara objašnjena je grafički i matematički. Definirane su mjerne jedinice.

Sadržaj:

- Definicije
- Šta je vibracija?
- Mehanički parametri
- Sistem masa-opruga
- Kako izmjeriti vibraciju?
- Tipovi signala
- Opis signala u vremenskom domenu
- Konverzija: ubrzanje, brzina, pomak
- Mjerne jedinice

Ishod lekcije

Ovom lekcijom dobijate osnovno razumjevanje o:

- Fundametalnoj prirodi vibracija
- Mehaničkim parametrima koji opisuju vibraciju
- Tipovima signala
- Odnosu između pomaka, brzine i ubrzanja vibracijskog kretanja
- Mjernim jedinicama
- Važnosti mjernog lanca

UVOD

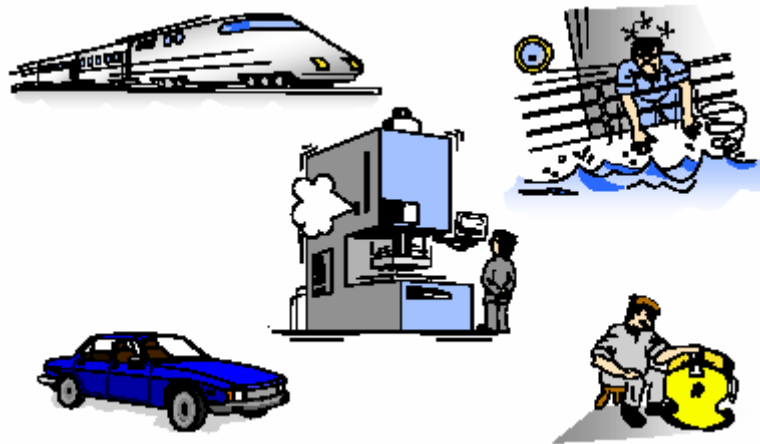
Otkako je čovjek počeo da gradi mašine za industrijsku upotrebu, a naročito otkako su motori postali pokretači tih mašina, neminovni su problemi povezani sa pojavom vibracijama, njihovom redukcijom i izolacijom, a zadatak inženjera je da iznađu adekvatna rješenja tih problema.

Tehnike koje se primjenjuju za smanjivanje uticaja vibracija i sama izolacija vibracija postali su sastavni dio procesa konstruisanja mašina, a potreba za tačnim mjerenjem i analizom mehaničkih vibracija je sve veća. U prošlosti, kada su industrijske mašine bile relativno spore i robusne, problem vibracija je uspješno rješavan zahvaljujući istančanim osjetilima za sluh i dodir kod iskusnih inženjera, ili pomoću jednostavnih optičkih instrumenata pomoću kojih su se mjerili pomaci usljed vibracija.

Tokom posljednjih 20-ak godina razvijene su potpuno nove tehnologije za mjerenje vibracija, pogodne za primjenu na savremenim visokobrzinskim mašinama koje su izložene visokim naprezanjima tokom rada. Korištenje piezoelektričnih akcelerometara pomoću kojih se vibracijsko pomjeranje konvertuje u električni signal, kao i raznih elektroničkih mjernih i akvizicijskih uređaja, mjerenje i analiza vibracija su postali pouzdani i široko korišteni inženjerski alati.

ODAKLE POTIČU VIBRACIJE?

U praksi je vrlo teško izbjeći pojavu vibracija. Vibracija je svakodnevni fenomen i susrećemo je u našim kućama, tokom transporta, pri radu.

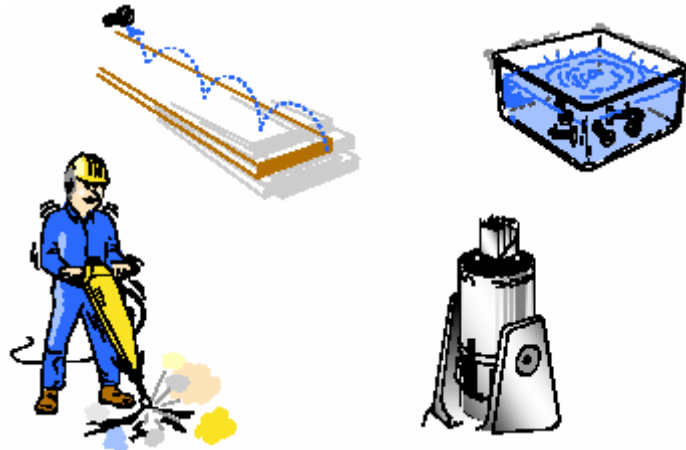


Sl. 1. Vibracije u svakodnevnom životu

Vibracije su rezultat dinamičkih sila u mašinama koje imaju pokretne dijelove, kao i u strukturama koje su vezane za mašine. Vibracije obično nastaju kao dinamički efekti postojećih proizvodnih tolerancija, zazora, kotrljajućih i kliznih kontakata između elemenata mašina, kao i zbog postojanja debalansa kod mašina sa rotirajućim kretanjem. Često vrlo male i u početku beznačajne vibracije mogu pobuditi rezonanciju nekih drugih dijelova strukture i mogu se pojačati do te mjere da postanu glavni i vrlo ozbiljan izvor naraslih vibracija i buke. Različiti dijelovi mašine vibriraju sa različitim amplitudama i frekvencijama. Vibracije izazivaju zamor i habanje. Često su odgovorne za otkaz koji se može desiti na kojoj mašini.

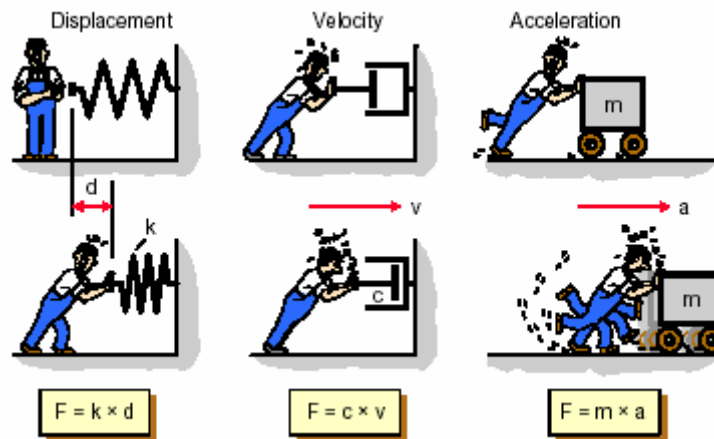
Ponekad vibracije mogu biti i korisne. Postoji dosta mašina i uređaja koji svoju osnovnu funkciju zasnivaju upravo na vibracijama, kao na primjer sita, pokretne traka za transport

sitnih komada, betonski kompaktori, ultrazvučne kade za čišćenje, razbijači kamena, maljevi, nabijači, itd. Pobuđivači vibracija, tzv. šejkeri, su uređaji koji generišu vibraciono kretanje i služe za ispitivanje mašina, uređaja i proizvoda koji moraju zadovoljiti svoje fizičke i radne performanse čak i kada su podvrgnuti djelovanju vibracija (npr. elektronički uređaji na raznim voznim sredstvima).



Sl.2. Primjeri korisnih vibracija

PARAMETRI MEHANIČKOG SISTEMA



Sl. 3. Mehanički parametri

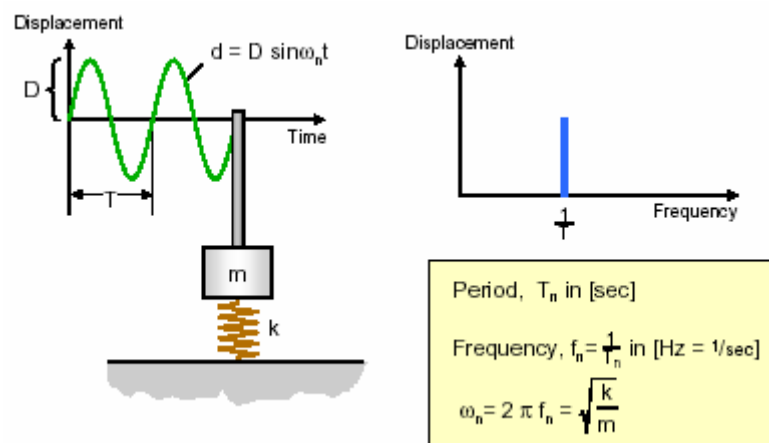
Svaki mehanički sistem karakterišu tri osnovne fizičke veličine: inercija, krutost i prigušenje. Pri modelovanju mehaničkog sistema inercija se predstavlja masom m , krutost se predstavlja oprugom konstante krutosti k , a prigušenje se prikazuje prigušnicom koeficijenta prigušenja c . Djelovanje konstante sile F na masu m proizvešće kretanje mase konstantnim ubrzanjem a . Djelovanje konstante sile F na oprugu proizvešće sabijanje (pomjeranje) opruge za konstantnu vrijednost d . Djelovanje konstante sile F na klip prigušnice proizvešće kretanje klipa konstantnom brzinom v . Odgovarajuće sile se nazivaju sila inercije, sila u opruzi (restituciona sila), sila prigušenja, respektivno.

ŠTA JE VIBRACIJA?

Vibracija u opštem smislu predstavlja oscilatorno kretanje mehaničkog sistema pri čemu su pomjeranja tačaka sistema mala u poređenju sa dimenzijama samog sistema. Kaže se da tijelo vibrira kada izvodi oscilatorno kretanje oko svog ravnotežnog položaja. Oscilacija je periodično kretanje oko ravnotežnog položaja, tj. kretanje koje se ponavlja nakon nekog vremenskog intervala.

Najjednostavniji oblik vibracionog sistema: masa-opruga

Najjednostavniji oblik vibracionog kretanja jesu slobodne harmonijske oscilacije bez prigušenja, predstavljene modelom masa-opruga. Kada se sistem kojeg čine masa i opruga dovede u kretanje zadavanjem nekog početnog pomjeranje ili brzine oscilujućoj masi, on će se nastaviti kretanje konstantnom frekvencijom i amplitudom teoretski do u beskonačnost. Sistem je doveden u oscilovanje koje ima sinusnu formu talasa.



Sl. 4. Najjednostavniji oblik oscilatornog sistema

Sinusna kriva

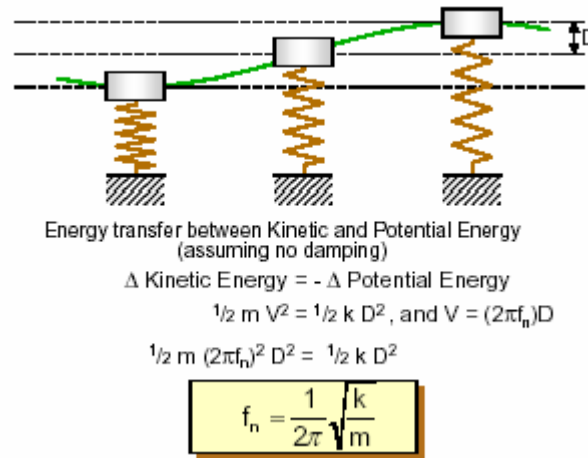
Ukoliko pratimo kretanje sistema masa-opruga tokom vremena, primjetićemo da je to kretanje harmonijsko i opisano je sinusnom krivom $d(t) = D \sin \omega_n t$, definisanom amplitudom (D) i periodom (T). Frekvencija je broj punih ciklusa oscilacija izvedenih u jedinici vremena (u jednoj sekundi), mjeri se u hercima [Hz] i jednaka je recipročnoj vrijednosti perioda. Množenjem frekvencije sa 2π dobija se kružna frekvencija ω_n , koja je proporcionala kvadratnom korjenu iz količnika krutosti opuge k i mase m . Frekvencija oscilacija naziva se prirodna ili sopstvena frekvencija f_n . Čitav sinusni talas može se opisati formulom $d(t) = D \sin \omega_n t$, gde je d -trenutni pomak a D - maksimalan pomak (amplituda).

SLOBODNE NEPRIGUŠENE VIBRACIJE

Kada sistem masa-opruga slobodno osciluje ukupna energija ostaje konstantna, ali se tokom kretanja mijenja iz kinetičke u potencijalnu i obrnuto.

U trenutku kada se postiže maksimalni pomak (maksimalno udaljenje mase od ravnotežnog položaja), brzina, pa time i kinetička enegrija, postaju jednake nuli, a potencijalna energija je

$(kD^2)/2$. U položaju ravnoteže potencijalna energija je jednaka nuli a kinetička energija je maksimalna i iznosi $(mV^2)/2$.



Veza između vibracijskih parametara

Za oscilatorno kretanje opisano zakonom pomaka d , brzinu v nalazimo diferenciranjem pomaka po vremenu, dok ubrzanje a nalazimo diferenciranjem brzine po vremenu:

$$d = D \sin \omega_n t$$

$$v = \frac{d}{dt} (D \sin \omega_n t) = D \omega_n \cos \omega_n t = V \cos \omega_n t$$

$$a = \frac{d}{dt} (D \omega_n \cos \omega_n t) = -D \omega_n^2 \sin \omega_n t = -A \sin \omega_n t$$

Veličine D , V i A predstavljaju amplitude pomjeranja, brzine i ubrzanja. Ove amplitude povezane su na sljedeći način:

- ukoliko je poznata amplitude pomjeranja D , onda je amplituda V brzine umnožak amplitude pomaka i sopstvene kružne frekvencije ω_n , a amplituda ubrzanja A je umnožak amplitude brzine i sopstvene kružne frekvencije ω_n ili umnožak amplitude pomaka i kvadrata sopstvene kružne frekvencije ω_n

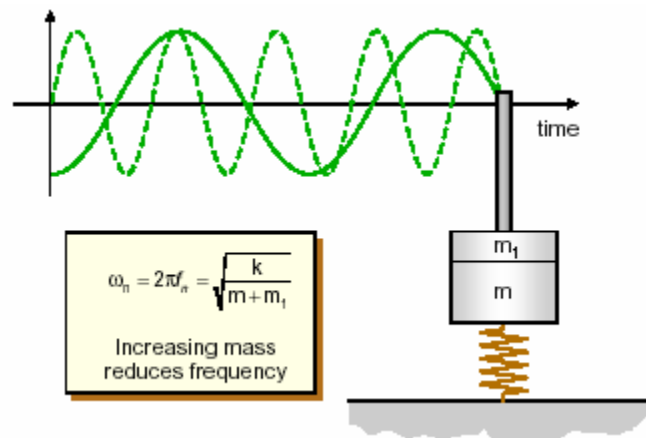
$$D ; \quad V = D \omega_n ; \quad A = V \omega_n = D \omega_n^2$$

- ukoliko je poznata amplitude ubrzanja A , onda je amplituda brzine V količnik amplitude ubrzanja i sopstvene kružne frekvencije ω_n , a amplituda pomjeranja D je količnik amplitude brzine i sopstvene kružne frekvencije ω_n ili količnik amplitude ubrzanja i kvadrata sopstvene kružne frekvencije ω_n

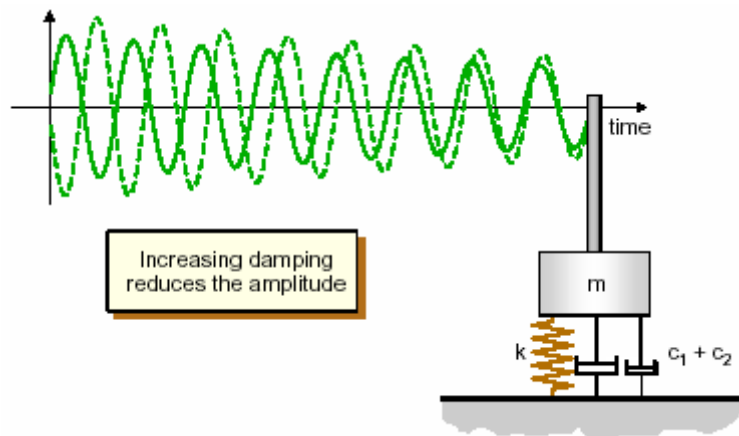
$$A ; \quad V = A / \omega_n ; \quad D = V / \omega_n = A / \omega_n^2$$

Efekat povećanja mase sistema

Povećanjem mase vibrirajućeg sistema povećava se period oscilovanja, tj. smanjuje se frekvencija oscilovanja.



SISTEM MASA-OPRUGA- PRIGUŠIVAČ

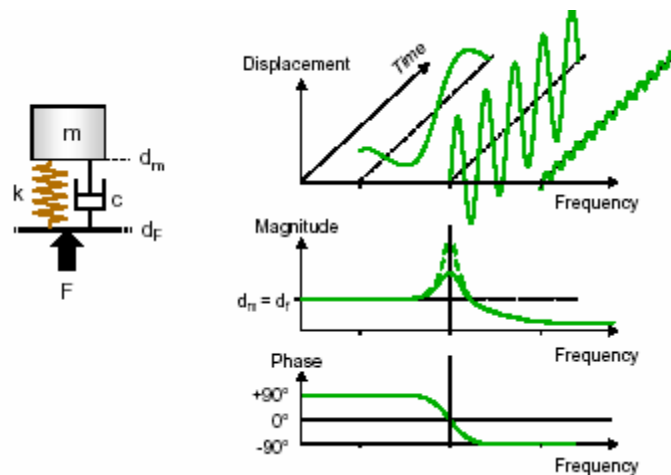


Dodavanje prigušivača karakteristike c sistemu masa-opruga rezultovaće će smanjivanjem amplitude pomjeranja sistema tokom vremena. Što je veće prigušenje to će amplituda pomjeranja brže opadati.

Frekvencija oscilovanja, poznata kao prigušena frekvencija oscilovanja, je konstantna i gotovo jednaka prirodnoj frekvenciji. Prigušena prirodna frekvencija opada lagano sa povećavanjem stepena prigušenja.

PRINUDNE VIBRACIJE

Ako vanjsku (prinudnu) sinusoidalnu silu primjenimo na sistem, sistem će slijediti silu, što znači da će prinudno kretanje sistema imati istu frekvenciju kao vanjska sila. Međutim, može postojati razlika u amplitudi i fazi vanjske sile i pomjeranja sistema, kako je pokazano na slici.

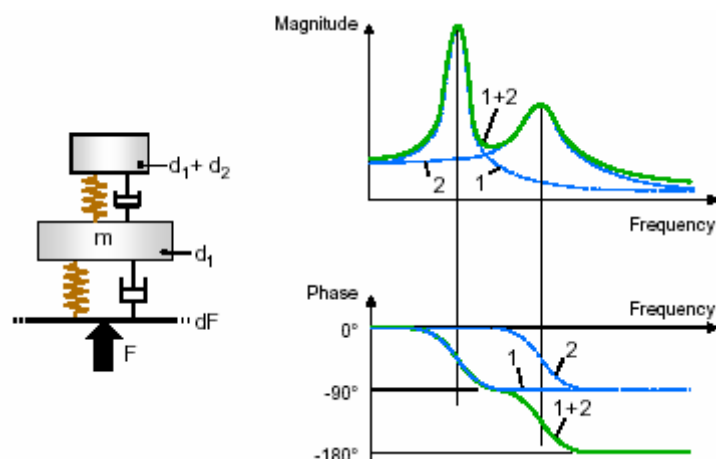


Uzmimo da se frekvencija prinudne sile mijenja tokom vremena, počevši od vrijednosti koja je manja od prirodne frekvencije sistema. Porastom frekvencije prinudne sile amplituda vibrirajućeg sistema će takođe rasti i dostiće maksimum kada se izjednače frekvencija sile i sopstvena fekvencija sistema. Ako nema prigušenja u sistemu ($c=0$) amplituda pomaka sistema može teoretski da naraste do u beskonačnost. Ovu pojavu nazivamo rezonancija. Rezonantno oscilovanje je, zbog velikih amplituda oscilovanja, izuzetno je nepovoljno za sistem te ga treba izbjegavati.

Ako nastavimo dalje povećavati frekvenciju prinudne sile tako da izademo iz rezonantnog oscilovanja sistema, povećaće se i frekvencija oscilatornog sistema masa-opruga-prigušivač za istu vrijednost, ali se amplituda i faza mogu mijenjati u skladu sa krivama na dijagramu pomak-vrijeme.

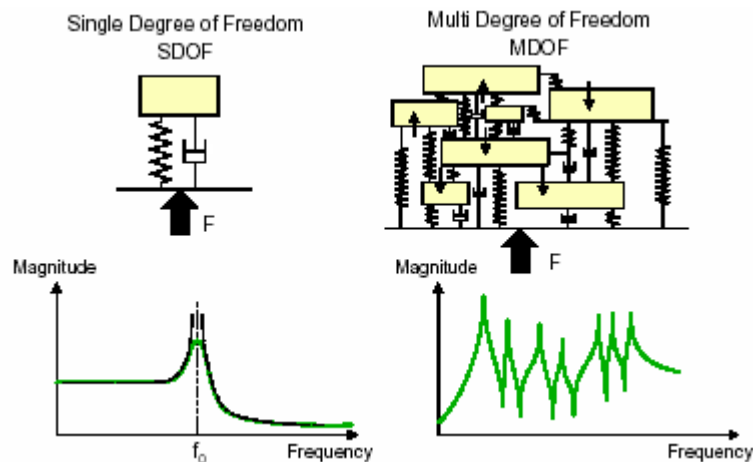
Pojava porasta amplitude oscilovanja pri rezonanciji, tj. pri jednakim frekvencijama prinudne sile i sopstvene frekvencije sistema, očigledna je i na dijagramu amplituda-frekvencija. Takođe, dijagram amplituda-frekvencija pokazuje i promjenu faze između prinudne sile i oscilacije sistema, tako da sila i oscilacija sistema imaju istu fazu u području gdje je frekvencija sile manja od sopstvene frekvencije sistema, a različitu fazu u području gdje frekvencija sile veća od sopstvene frekvencije sistema.

KOMBINOVANI ODGOVOR



Ako razmatramo realni mehanički sistem, njegovo oscilovanje će biti puno složenije nego oscilovanje prostog mehaničkog sistema masa-opruga. Jednostavan primjer složenog mehaničkog sistema kojeg predstavljaju dva povezana oscilatorna sistema prikazan je na slici. Ovaj složeni sistem proizvodi kombinovani ukupni odgovor, a funkcija frekvencijskog odgovora pokazuje dva rezonantna vrha koji odgovaraju komponentnim sistemima.

MODELI ODGOVORA SISTEMA



Sistem sa jednim stepenom slobode

Sistem koji je sačinjen samo od jedne mase, opruge i prigušivača naziva se sistem sa jednim stepenom slobode kretanja (može se kretati samo u jednom pravcu). Pri razmatranju dinamičkog odgovora sistema na zadatu pobudnu silu, u amplitudno-frekvencijskom domenu može se uočiti jedan rezonantni vrh. Faza se obično ne razmatra pri jednostavnom vibracionom mjerenju, ali je od velike važnosti pri analizi sistema.

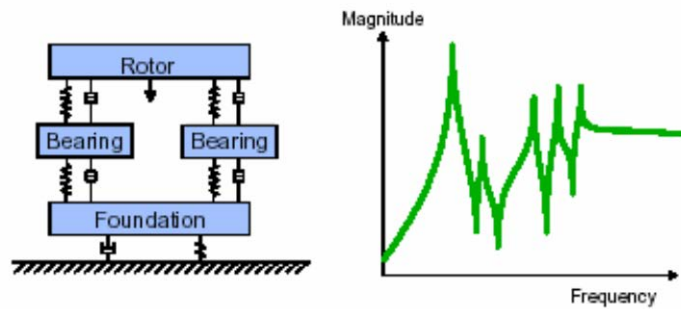
Sistem sa više stepeni slobode kretanja

Mehanički sistem sačinjen od više povezanih masa, opruga i prigušivača, ili sistem koji može da vrši kretanje u više pravaca, naziva se sistema sa više stepeni slobode kretanja. Dinamički odgovor sistema u amplitudno-frekvencijskom domenu će imati po jedan rezonantni vrh za svaki od stepeni slobode kretanja. Uglavnom mehanički sistemi imaju više stepeni slobode kretanja, iako je često vrlo teško razdvojiti pojedine mehaničke komponente, a još teže predstaviti model sistema što je moguće jednostavnije.

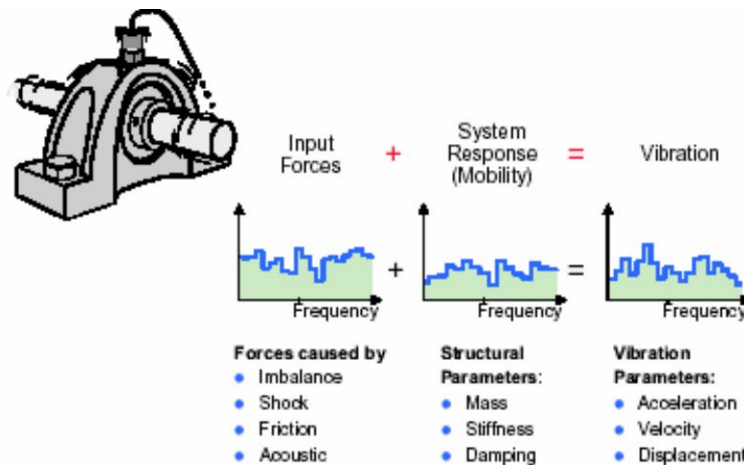
DINAMIČKI ODGOVOR “STVARNOG SISTEMA”

U većini slučajeva čak i jednostavni mehanički sistemi moraju biti razmoterni kao sistemi sa više stepeni slobode, kao što ilustracija pokazuje jednostavan rotor sa parom ležajeva.

U praksi vibracijski signal sadrži mnogo frekvencija koje se dešavaju istovremeno i ne mogu se direktno vidjeti iz amplitudno-vremenskog domena signala. Ipak, preslikavanjem signala u amplitudno-frekvencijski domen, sve frekvencijske komponente signala postaju direktno sagledive.



SILE I VIBRACIJE



Ukoliko na mehanički sistem djeluje pobudna sila, sistem će proizvesti određeno kretanje (vibraciju) kao odgovor na zadatu pobudu. Odgovor sistema (vibracija) zavisi od karakteristike sistema, tzv. “pokretljivosti sistema” (system mobility). Ako je poznata pobudna sila i “pokretljivosti sistema” on da se može predvidjeti kakav će biti odgovor sistema (vibracija).

Modalna analiza ili druge metode vibracijskog ispitivanja koriste se za dinamičko modelovanje sistema. Nakon što je uspostavljen model sistema, možemo izračunati njegovu “pokretljivost” za silu zadatu u nekoj tački sistema, i tako predvidjeti vibraciju na različitim lokacijama sistema. Takav model može takođe biti iskorišten da bi se izračunalo opterećenje sistema koje može dovesti do loma.

ZAŠTO MJERITI VIBRACIJE?



- Da bi provjerili da li amplitude i frekvencije vibracija ne prelaze neke dopuštene granice materijala (npr. kao što to opisuje Velerova kriva)
- Da bi izbjegli pobudu sistema na rezonantnim frekvencijama određenih dijelova mašine
- Da bi izveli prigušivanje ili izolaciju izvora vibracija
- Da bi obezbjedili redovno održavanje mašine
- Da bi izgradili ili verificovali model strukture pogodan za računarsku analizu (analiza sistema)

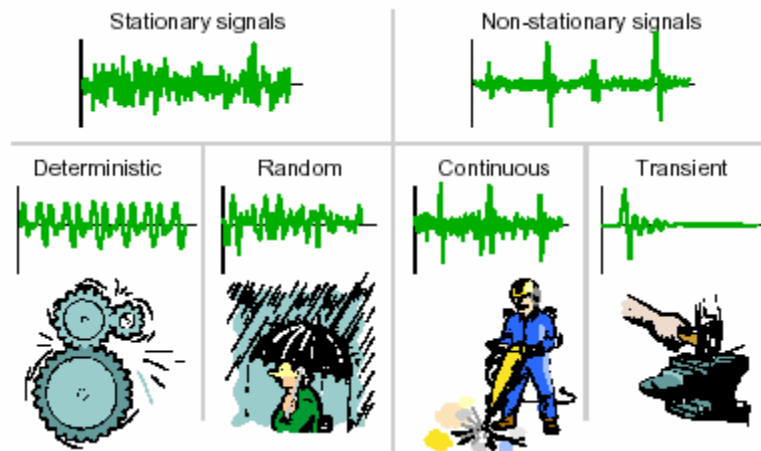
Velerova kriva je kriva koja opisuje nivo napona do kojeg smijemo opterećivati strukturu određeni broj ciklusa (trajna čvrstoća). Visokim naprezanjima struktura smije biti izložena samo mali broj ciklusa, a smanjenjem nivoa naprežanja može se povećati broj ciklusa koje struktura može da izdrži do loma. Za većinu metala postoji granica izdržljivosti za koju izdržljivost postaje beskonačna. Veličina tog napona vrlo je važna i često se nalazi tako da se objekt podvrgne naprežanju u 10 000 000 ciklusa što je bazirano na iskustvu da upravo tim brojem ciklusa se postiže granica izdržljivosti.

KAKO ODREĐUJEMO VIBRACIJU?

- Izvođenjem mjerenja
- Analizom rezultata (veličina amplitude i frekvencija)

S ciljem vršenja analize, prvo je potrebno definisati koji tipovi vibracijskih signala postoje i kako ih mjerimo.

TIPOVI SIGNALA



Signali

Osnovna podjela signala je na stacionarne i nestacionarne signale. Stacionarni signali se dijele na determinističke signale i slučajne signale (*random signal*). Nestacionarni signali se dijele na kontinuirane signale i tranzijentne signale.

Stacionarni deterministički signali su sačinjeni od sinusnih komponenata na određenim frekvencijama.

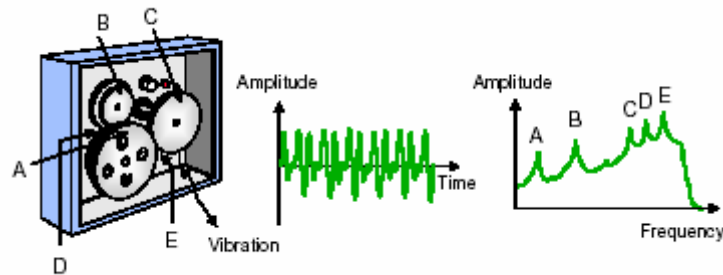
Slučajni signali su okarakterisani time da njihova trenutna vrijednost ne može biti predviđena, ali se može karakterisati određenim statističkim funkcijama vjerovatnosti i gustoće, tj. može se mjeriti njihova prosječna vrijednost.

Slučajni signali imaju frekvencijski spektar koji je kontinuirano raspoređen po frekvencijama. Kontinuirani nestacionarni signali imaju neke sličnosti kako sa tranzijentnim tako i sa stacionarnim signalima. Tokom analize kontinuirani nestacionarni signal trebao bi se tretirati kao slučajni signal ili podijeljen u individualne tranzijente i tretiran kao tranzijent.

Tranzijentni signali su definisani kao signali koji počinju i završavaju na konstantnom nivou, obično nuli, unutar vremena analize.

DETERMINISTIČKI SIGNALI

Vibracijski signal mjeran na reduktoru može da izgleda kao signal prikazan na slici. U frekvencijskom domenu ovaj signal ima niz razdvojenih rezonantnih vrhova (diskretnih frekvencijskih komponenti) koji se, poznavajući broj zuba zupčanika i njihovu brzinu, mogu povezati sa tačno određenim dijelovima sistema. Signal koji je prikazan naziva se deterministički, s obzirom na to da je njegova trenutna vrijednost predvidljiva za svaki trenutak vremena.



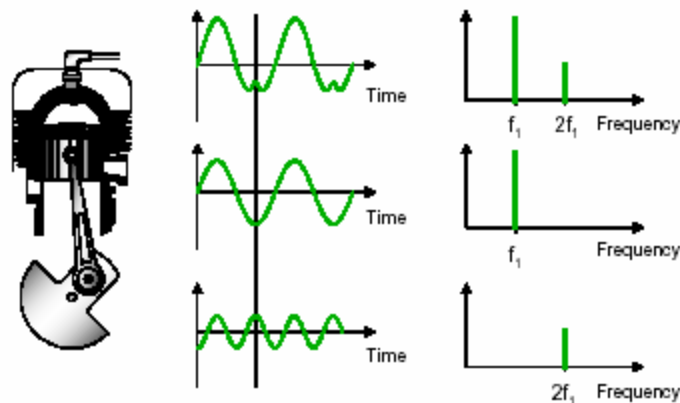
Uloga frekvencijske analize

Razlaganje vibracijskog signala u pojedinačne frekvencijske komponente naziva se frekvencijska analiza. Ova tehnika smatra se osnovom vibracijske analize i dijagnostike. Grafički prikaz nivoa vibracija u funkciji frekvencije naziva se frekvencijski spektar ili spektrogram.

Kada izvodimo frekvencijsku analizu vibracija mašinskih struktura, obično pronalazimo određeni broj istaknutih periodičnih frekvencijskih komponenta koje su direktno povezane sa osnovnim (fundamentalnim) kretanjima raznih dijelova mašine. Pomoću frekvencijske analize možemo da otkrijemo izvore neželjenih vibracija.

Primjer prikazuje mjerenje i frekvencijsku analizu vibracijskog signala mjenog na kućištu reduktora. Frekvencijski spektar daje informacije o nivoima i frekvencijama vibracija kućišta reduktora koje su prouzrokovane rotiranjem dijelova i sprezanja zupčanika.

DETERMINISTIČKI SIGNALI I HARMONICI

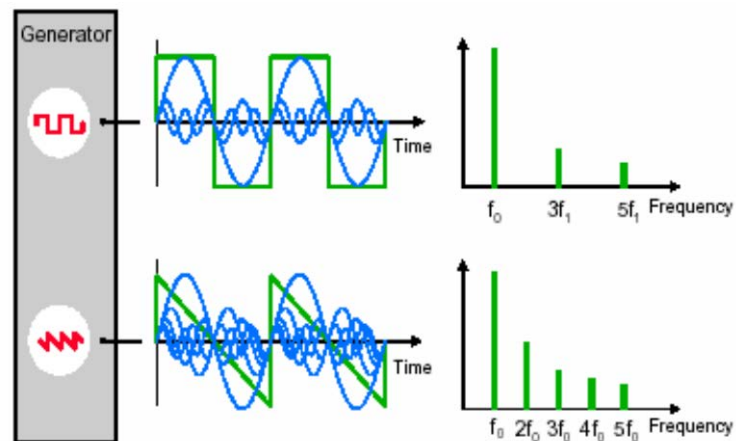


Kretanje mehaničkog sistema može biti sačinjeno od jedne komponente na jednoj frekvenciji (npr. zvučna viljuška) ili može biti istovremeno sačinjeno od nekoliko komponenata na različitim frekvencijama, kao što je slučaj kod kretanja klipa motora sa unutrašnjim sagorijevanjem.

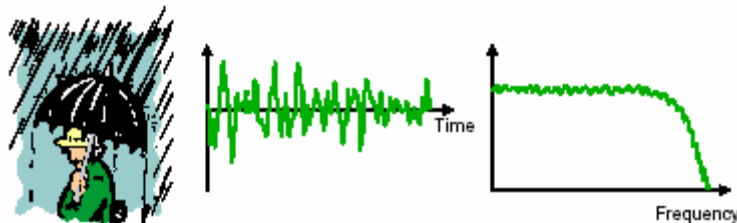
Signal je u ovom slučaju podjeljen u pojedinačne komponente, kao u vremenskom tako i u frekvencijskom domenu.

Harmonici

Mnogi nesinusoidni signali mogu biti podjeljeni u brojne sinusoide koje su u međusobnom harmonijskom odnosu. Data su dva primjera: harmonijske komponente, tzv. harmonici, su uvijek u određenom odnosu prema osnovnoj frekvenciji.

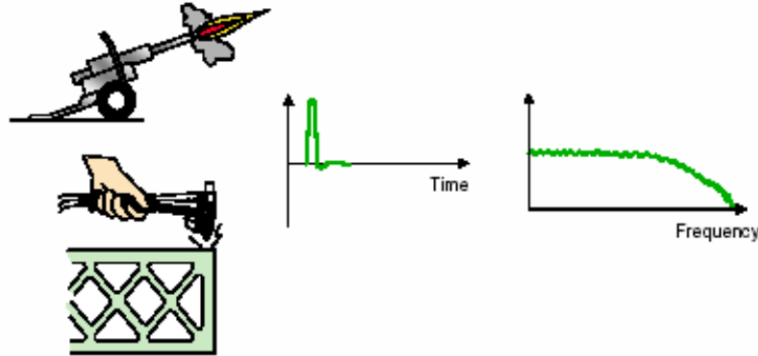


SLUČAJNI SIGNAL



Tipičan primjer slučajne vibracije je vibracija izazvana protokom fluida. Slučajni signal nema periodike i harmonijski povezane komponente. Taj signal je okarakterisan potpuno slučajnim kretanjem, tako da njegova trenutna vrijednost ne može biti predviđena. Slučajne vibracije mogu, ipak, biti opisane svojim statističkim osobinama. Stacionarni slučajni signal ima frekvencijski spektar koji nije sačinjen od diskretnih frekvencijskih komponenata, nego od kontinuirano raspoređene frekvencije.

UDARNI (IMPULSNI) SIGNALI

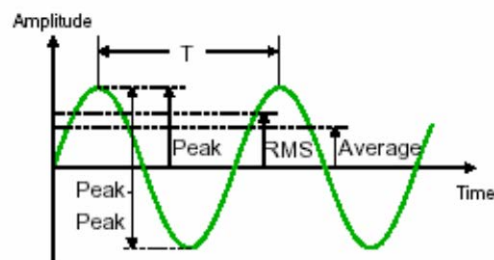


Mehanički impuls je kratki udar vibracione energije. Iako je impuls beskonačno kratak, imaće frekvencijski spektar koji je raspoređen kontinuirano duž frekvencije ose. Budući da impuls uvijek ima ograničeno trajanje njegov frekvencijski spektar imaće ograničen frekvencijski opseg.

PARAMETRI VREMENSKOG SIGNALA

Mjerenje vremenskog signala je najjednostavnija forma vibracijske analize. Postoje brojne karakteristike za vrednovanje amplitude (nivoa) vibracijskog signala:

- Vršna vrijednost (peak)
- Vrijednost od vrha do vrha (peak-peak)
- Srdnja vrijednost (average)
- Efektivna vrijednost (RMS - root mean square)
- Faktor porasta (Crest factor)
- Periodičnost/Ponavljjanje (Periodicity/ Repetition Rate)
- Trajanje (Duration)



$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$	$\text{Average} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$	$\text{Crest Factor} : \frac{\text{Peak}}{\text{RMS}}$
--	---	--

Opis amplitude (nivoa) signala

Amplituda vibracije je veličina koja ukazuje na ozbiljnost vibracije i može se iskazati različitim vrijednostima.

Vrijednost amplitude od vrha do vrha (*peak-to-peak*) indikuje maksimalne amplitude signala koji opisuje vibraciju. Ovaj parameter je koristan u situacijama kada je vibracijsko pomjeranje dijelova mašine značajno sa stanovišta maksimalnih napreznja ili zamora materijala u mehaničkom sistemu.

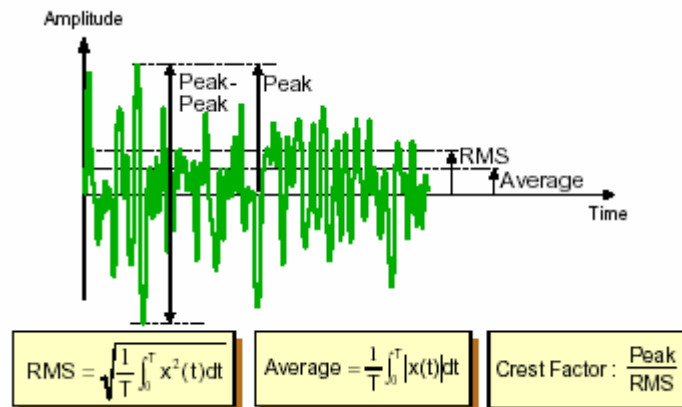
Vršna vrijednost amplitude (*peak*), A_z , je parameter naročito koristan za izražavanje nivoa kratkotrajnih udarnih vibracija. Ovaj parameter iskazuje samo maksimalnu vrijednost amplitude, dok ne uzima u obzir vremensku istoriju signala.

Srednja vrijednost (*average*), A_{sr} , je parameter koji uzima u obzir vremensku istoriju signala. Upotreba ovog parametra je ograničene praktične vrijednosti, jer nema direktne korelacije sa nekom fizičkom veličinom.

Efektivna vrijednost signala (RMS-root mean square), A_{ef} , je najvažnija mjera amplitude vibracije zbog toga što uzima u obzir vremensku istoriju signala. Na taj način ovaj parameter daje amplitudi signala vrijednost koja je direktno povezana sa energetske sadržajem signala, tj. destruktivnom sposobnosti date vibracije. Za harmonijski periodični signal važe relacije:

$$A_{ef} = \frac{A_z}{\sqrt{2}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} A_{sr}.$$

OPIS VREMENSKOG SIGNALA

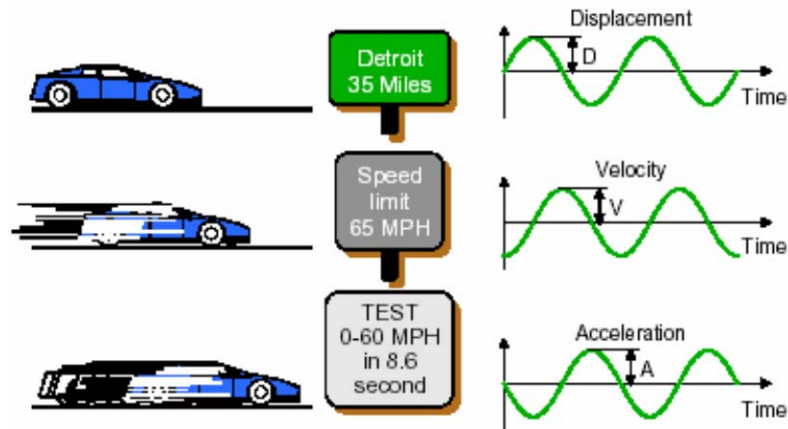


Prikazane veličine koje opisuju vremenski signal ne odnose se samo na jednostavan sinusoidni signal, nego na sve uobičajene vibracijske signale koji se mogu dobiti na mašinama, koji su sastavljeni od mnogo sinusoidnih komponenata.

LINEARNO NASUPROT OSCILATORNOM KRETANJU

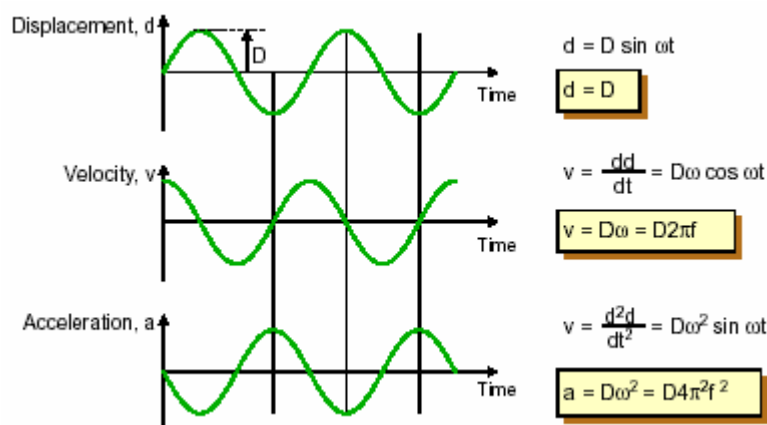
Kretanje objekta duž prave linije može se opisati u formi trenutne pozicije objekta, njegove brzine u datom trenutku i njegovog ubrzanja u tom trenutku.

Za oscilatorno kretanje na određenoj frekvenciji ova tri parametra su strogo povezana.



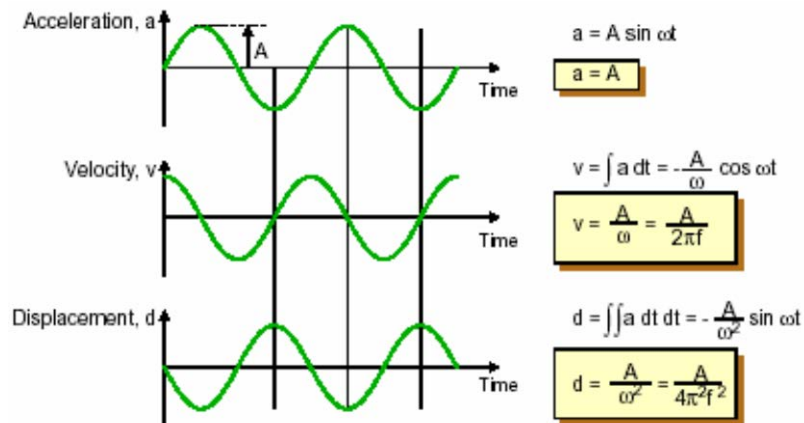
PRETVARANJE POMAK- BRZINA- UBRZANJE

Odnos između d , v , a



Ova tri mehanička parametra međusobno su povezana. Poznajući pomak, druge dvije veličine se mogu dobiti postupkom diferenciranja. Ako razmatramo signal sa samo jednom frekvencijskom komponentom, oblik i period signala ostaju isti bilo da ga razmatramo preko pomaka, brzine ili ubrzanja, jedino postoji fazna razlika ova tri parametra, što se vidi iz prikaza amplituda-vrijeme. Ako zanemarimo faznu razliku (što je obično slučaj) numeričke vrijednosti brzine i ubrzanja mogu se dobiti jednostavnim množenjem pomaka sa vrijednosti sopstvene frekvencije, kako je pokazano na slici.

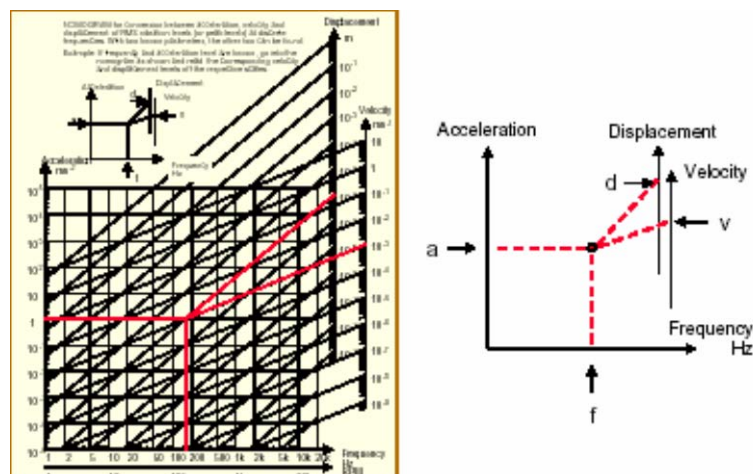
PRETVARANJE UBRZANJE-BRZINA-POMAK



Odnos između a , v , d

Ako je mjereni parametar ubrzanje, ostala dva vibracijska parametra se mogu dobiti postupkom integraljenja. U elektronskom smislu je integraljenje signala jednostavnije je od diferenciranja, Stoga je najbolje izabrati signal ubrzanja za vibracijsku analizu. Postoje i drugi razlozi za izbor ubrzanja kao parametra koji će biti mjereno.

KONVERZIJA UPOTREBOM NOMOGRAMA

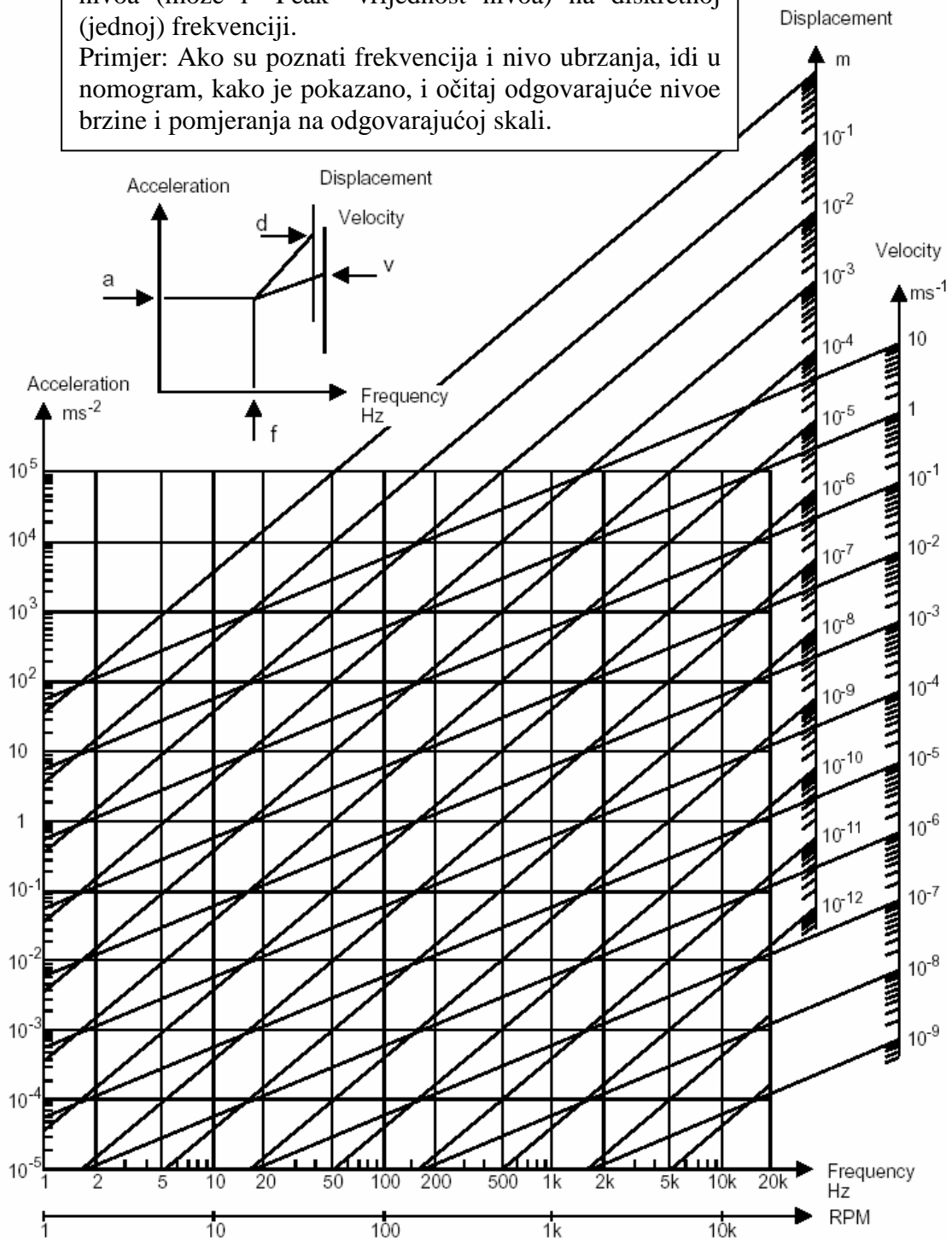


Upotreba Nomograma za konverziju između a , v i d

Ako poznamo frekvenciju vibracije i nivo ubrzanja, nivoi brzine i pomjeranja mogu lako biti izračunati upotrebom nomograma. Treba napomenuti da je nomogram ispravan samo za slučaj vibracija sa jednom frekvencijskom komponentom (prostih harmonijskih vibracija), a ne za signal koji sadrži nekoliko frekvencijskih komponenata.

Na slici je prikazan nomogram za konverziju između ubrzanja, brzine i pomaka iskazanih sa RMS vrijednosti nivoa (može i "Peak" vrijednost nivoa) na diskretnoj (jednoj) frekvenciji.

Primjer: Ako su poznati frekvencija i nivo ubrzanja, idi u nomogram, kako je pokazano, i očitaj odgovarajuće nivoe brzine i pomjeranja na odgovarajućoj skali.



JEDINICE VIBRACIJSKOG SIGNALA

Acceleration a	1ms^{-2} (m/s ²)	= 0.102g = 39.4 in/s ²
Velocity v	1ms^{-1} (m/s)	= 3.6 km/h = 39.4 in/s
Displacement d	1m	= 1000 mm = 39.4 in

$$1g \equiv 9.80665 \text{ ms}^{-2}$$

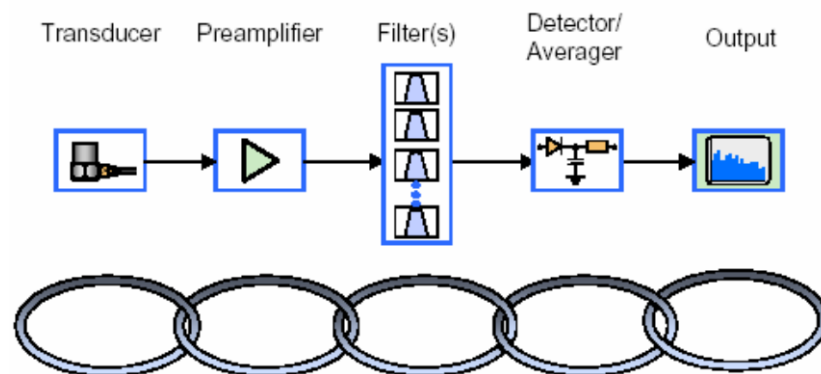
U SI sistemu su jedinice za ubrzanje, brzinu i pomak ms^{-2} , ms^{-1} i m, respektivno. Jedinica g često se koristiti u vibracijama i dolazi od gravitacijskog ubrzanja, vrijednost joj je:

$$1g = 9,80665 \text{ ms}^{-2}$$

slično kao što je

$$1 \text{ inch} = 25.4 \text{ mm}$$

MJERNI LANAC



Slika prikazuje mjerni lanac koji se koristi pri mjerenju vibracija.

Prikazani mjerni lanac, koji je najčešće u upotrebi, sastoji se od odgovarajućih davača (transducers), pojačivača (preamplifiers) pogodnih za dati davač, sistema za analizu (koji se mogu rangirati od jednostavnih detektora srednjih vrijednosti amplitude do složenih FFT analizatora), i izlaza koji može biti neki ekran, pisač ili drugi medij za pamćenje tih podataka.

Treba naglasiti da za svaki mjerni lanac, kao i za obični lanac, važi činjenica da je lanac onoliko jak koliko je jaka njegova najslabija karika.

“SMEĆE NA ULAZU=SMEĆE NA IZLAZU”
GIGO (garbage in=garbage out)

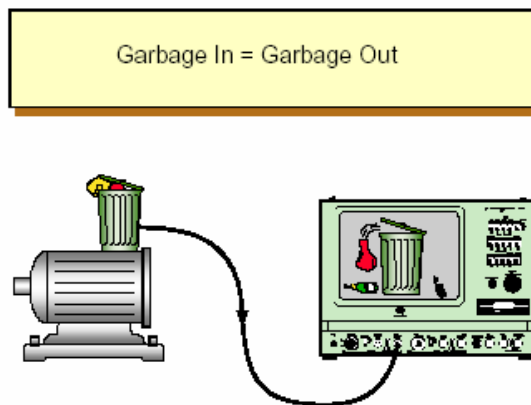
U razvoju novih vozila, monitoringu mašina i mnogim drugim aplikacijama mjerenja vibracija, od izuzetne je važnosti imati vrlo visok stepen pouzdanosti u kvalitet mjerenja.

Sam izbor akcelerometra kao davača automatski ne povećava traženu pouzdanost, jer mora biti izabran odgovarajući tip, mora se koristiti ispravno, itd.

Ako korišteni akcelerometar daje loše rezultate iz bilo kog razloga, cjelokupan sistem za monitoring mašine pada u vodu, a rezultat loše analize vibracija može biti npr. neuobičajena konstrukcija automobila.

Važi princip **GIGO**, tj. onoliko “smeća” koliko uđe u mjerenje će i izaći iz mjerenja.

Ne smije se zaboraviti da je za kvalitetnu analizu sistema potreban ne samo odgovarajući software i hardware, nego i ostali povezani resursi, kako ljudski tako i finansijski.



OSNOVI MJERENJA I ANALIZE VIBRACIJA

(“Vibration measurement and analysis”, Bruel&Kjaer)

Rezime

U ovoj lekciji objašnjavaju se različiti načini obrade signala vibracije korištenjem detektora i filterskih analizatora. Objašnjeno je prezentovanje podataka korištenjem različitih brojnih osa i načini kombinovanja tipa analize sa tipom skale, fundamentalno pravilo proizvoda BT i izbor tipa filtera/analize, izbor parametara analize. Konačno, objašnjena je analiza signala i analiza sistema.

Sadržaj lekcije

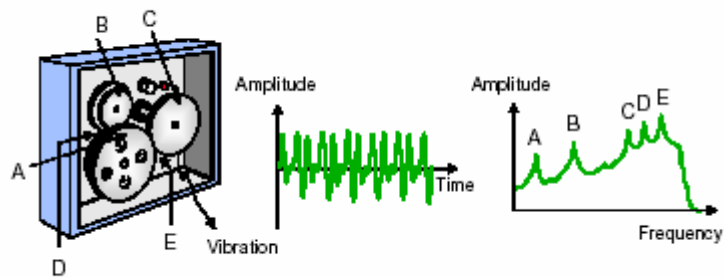
- Zašto izvoditi frekvencijsku analizu
- Spektar ili sveukupni nivo
- Filteri
- Linearana i logaritamska skala
- Amplitudna skala
- Parametri vibracija
- Detektor/osrenjivač
- Analiza signala i analiza sistema

Ishod lekcije

Ovom lekcijom dobijate osnovne informacije o tome kako:

- Izabrati pravi parametar za ocjenu vibracija
- Prezentovati izmjerene podatke na odgovarajući način
- Razumjeti osnovne parametara filtera i analize i postojeća ograničenja
- Razumjeti razliku između analize signala i analize sistema

ZAŠTO JE POTREBNA FREKVENCIJSKA ANALIZA?



Sl.1. Vibracijski signal u vremenskom i frekvencijskom domenu

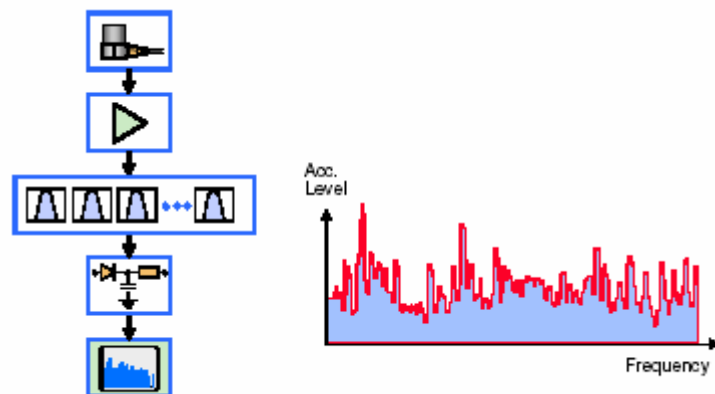
Uloga frekvencijske analize

Razlaganje vibracijskog signala u pojedinačne frekvencijske komponente naziva se frekvencijska analiza. Ova tehnika smatra se osnovom vibracijske analize i dijagnostike. Grafički prikaz nivoa vibracija u funkciji frekvencije naziva se frekvencijski spektar ili spektrogram.

Frekvencijski spektar u mnogim slučajevima daje detaljnu informaciju o nekom izvoru, koja ne bi mogla biti dobijena iz vremenskog signala. Primjer pokazuje mjerenje i frekvencijsku analizu vibracionog signala mjenog na kućištu prenosnika. Frekvencijski spektar daje informaciju o nivou vibracije prouzrokovane rotacijom dijelova i sprezanjem zupčanika, stoga predstavlja značajnu pomoć u identifikaciji izvora povećanih ili neželjenih vibracija iz tog ili nekog drugog izvora.

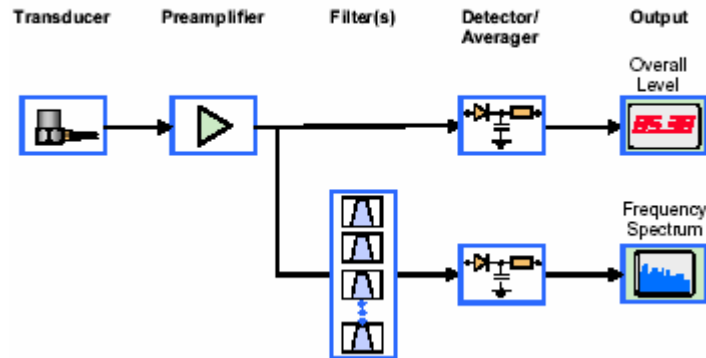
FREKVENCIJSKA ANALIZA

Proces frekvencijske analize je sljedeći: propuštanjem mjenog signala kroz filter i podešavanjem filtera da propušta određeni frekvencijski opseg (može da postoji i više filtera) dobja se veličina amplitude (nivoa) vibracija na različitim frekvencijama. Rezultat frekvencijske analize je frekvencijski spektar.



Sl.2. Frekvencijska analiza i frekvencijski spektar

FREKVENCIJSKI SPEKTAR ILI SVEUKUPNI NIVO?



Sl.3. Mjerenje ukupnog nivoa vibracije i frekvencijska analiza

Sveukupni nivo

Najjednostavniji način da se iskaže vibraciono stanje nekog sistema je da mu se pridruži neka brojna vrijednost. Uobičajeno je da se sveukupni nivo vibracije iskaže efektivnom vrijednosti amplitude vibracije (RMS), jer ovaj parametar je povezan sa energetske sadržajem signala.

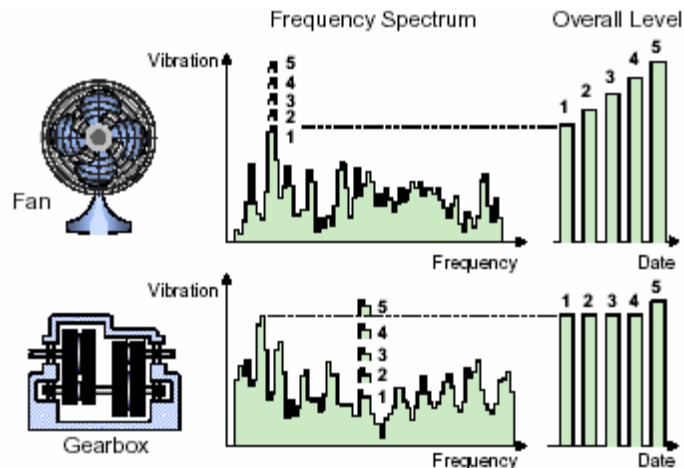
Međutim, ovaj parametar sam ne daje dovoljno informacija za vršenje bilo kakvog dijagnosticiranja stanja mehaničkog sistema. Za kvalitetnu analizu je potrebno više parametara.

Uloga frekvencijske analize

Frekvencijski spektar daje, u mnogim slučajevima, detaljne informacije o izvoru signala, koje ne mogu biti dobijene iz vremenskog signala. To omogućuje dijagnosticiranje sistema. Frekvencijski sadržaj signal se može naći na različite načine, korištenjem skenirajućih filtera, banaka filtera ili, kako je danas najčešće, digitalnim tretiranjem zapisa korištenjem Furijeove transformacije, tj. FFT analizatora.

Frekvencijski spektar ili sveukupni nivo

Da bi se donijela odluka da li je dovoljno izvesti monitoring i mjerenje sveukupnog nivoa vibracija ili je potrebna frekvencijska naliza, inženjeri koji se bave vibracijama moraju poznavati funkcionisanje ispitivane mašine i uobičajene kvarove koji se mogu desiti. Ilustracija pokazuje dvije različite situacije u monitoringu.



Sl.4. Primjeri mjerenja ukupnog nivoa vibracija i frekvencijske analize

Monitoring ventilatora: Najčešće oštećenje koje se dešava kod ventilator jeste debalans rotora, koji rezultira visokim nivoom amplitude vibracija na datoj frekvenciji (broju obrtaja). Značajno je da je upravo ovaj nivo amplitude vibracije ujedno i najviši nivo amplitude vibracije u spektru. Da bi vidjeli da li taj debalans raste tokom vremena, dovoljno je mjeriti sveukupni nivo vibracija u određenim vremenskim intervalima. Sveukupni nivo daće informaciju o narastanju bebalansa, kao što bi dao i frekvencijski spektar.

Monitoring prenosnika: Postojanje oštećenja ili pohabanost zupčanika u prenosniku rezultovaće povišenim nivoom amplitude vibracija na frekvencijama sprežanja zupčanika (broj okretaja vratila, broj zuba) i njihovim odgovarajućim harmonicima. Nivoi amplituda na tim frekvencijama su obično mnogo niži nego najviši nivo u frekvencijskom spektru. Mjerenje sveukupnog nivoa koji indicira najviše amplitude vibracija, prikrilo bi informaciju vezanu za stanje zupčanika. Stoga je neophodno koristiti kompletan spektar tj. frekvencijsku analizu za kompariranje nivoa amplitude vibracija snimljenih tokom vremena, koje će dovesti do detekcije oštećenja zupčanika.

Važi opšte pravilo da je mjerenje sveukupnog nivoa dovoljno za jednostavne, nekritične mehanizme, dok oni kompleksniji i kritičniji mehanizmi zahtjevaju spektralnu analizu.

PREZENTOVANJE MJERNIH PODATAKA

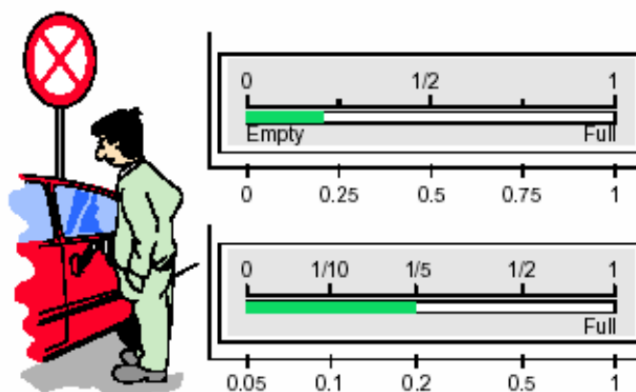
Često je od velike važnosti pravilan izbor načina za prezentaciju podataka.

Najjednostavnije je izabrati linearnu skalu čiji je opseg određen opsegom podataka, ali često linearna skala onemogućava jasnu vidljivost važnih podataka, te je tada je korisno koristi logaritamsku skalu.

Linearna i logaritamska skala koriste se za prezentovanje podataka u amplitudno-frekvencijskom domenu, kako za vrijednosti amplituda vibracija na ordinatnoj osi, tako i za vrijednosti frekvencija na apcisi.

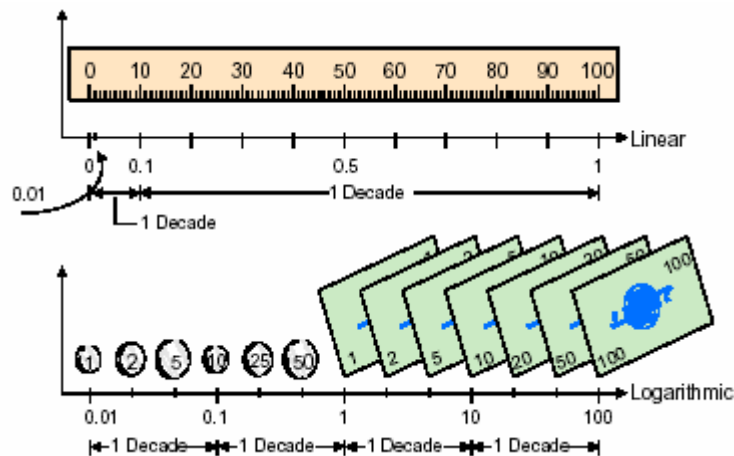
Skale

Zaboravimo na vibracije koji trenutak i razmotrimo situaciju koja je poznata većini ljudi koji voze automobil. Često je teško prosuditi o količini goriva preostalog u rezervoaru automobila ako pokazivač goriva ima linearnu skalu. Ako pokazivač ima logaritamsku skalu, donji kraj skale biće "razvučen" tako da je mnogo lakše procijeniti preostalu količinu goriva u rezervoaru. Primjetimo da logaritamska skala nema nulu.



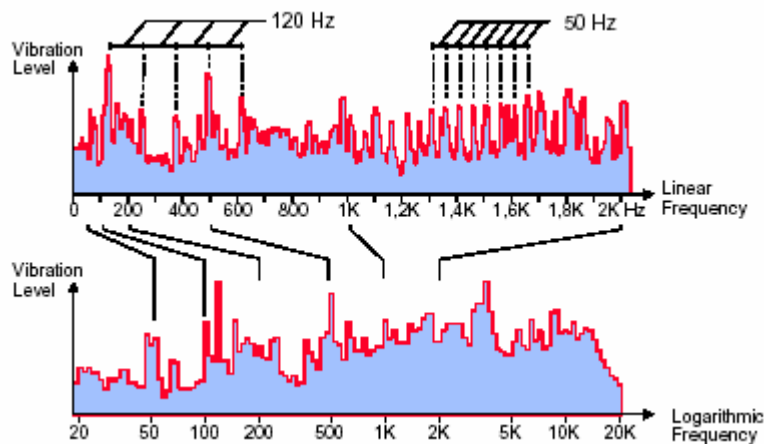
Sl.5. Poređenje linearne i logaritamske skale

Koju skalu koristiti zavisi od jedinice koja treba biti prikazana. Skale za razdaljinu i vrijeme su tipični primjeri linearnih skala, ali za prikazivanje veličina kod kojih je važniji odnos između dvije veličine nego apsolutni iznos jedne vrijednosti prednost je korištenje logaritamske skale. Kao dobar primjer mogu poslužiti različite valute u monetarnim sistemima, jer ako ih prikažemo u logaritamskoj skali, pokazivaće jednaka rastojanja između pojedinih vrijednosti.



Sl.6. Primjer linearne i logaritamske skale

FREKVENCIJSKA SKALA: LINEARNI ILI LOGARITAMSKI PRIKAZ?

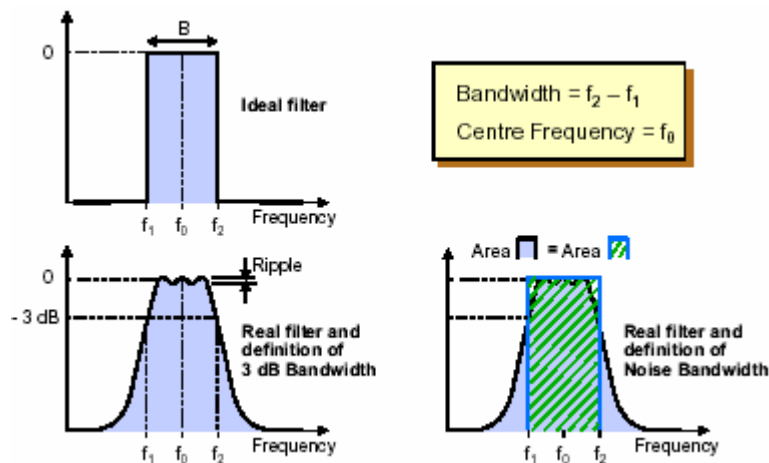


Sl.7. Linearna i logaritamska frekvencijska skala

Linearna nasuprot logaritamske frekvencijska skale

U mjerenju vibracija koriste se i linearna i logaritamska frekvencijska skala. Linearna skala ima prednost u tome što je lako identifikovati harmonijski povezane komponente u signalu. Logaritamska skala, međutim, ima prednost u tome što je na njoj moguće prikazati mnogo veći frekvencijski opseg na ograničenom prostoru, a svaka od dekada jednako je naglašena. Na slici je dat vibracijski signal prenosnika prikazan u dvije različite skale. Harmonijski povezane komponente u signalu lako je identifikovati na linearnoj skali, a logaritamska skala daje mnogo više detalja u donjem dijelu skale (na nižim frekvencijama), dok istovremeno pokriva mnogo širi frekvencijski opseg.

PROPUSNI FILTERI I ŠIRINA OPSEGA



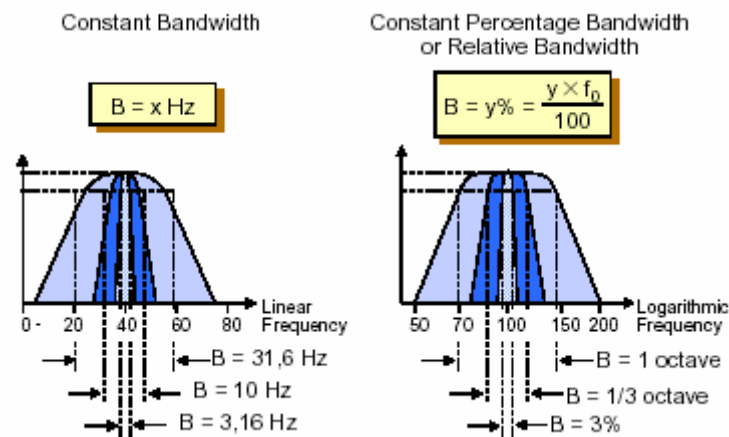
Sl.8. Izgled idealnog i realnog filtera

Nakon izbora frekvencijske skale, sljedeći korak je izbor oblika filtera koji se koriste u analizi. Ilustracija pokazuje osobine idealnih i realnih filtera.

Idealni propusni filter dopustiće prolaz samo signalima čije frekvencije leže unutar propusnog opsega (širina opsega $B=f_2-f_1$), dok će svi ostali biti odbačeni. Idealni filteri, međutim, ne postoje. Realni filteri propuštaju i signale sa frekvencijama izvan propusnog opsega, ali u prigušenoj formi. Što je frekvencija udaljenija od one koja se propušta, utoliko će prigušenje biti veće. Širina opsega realnih filtera može se specificirati na dva načina:

1. Širina opsega na nivou -3 dB od platoa filtera, tzv. nivoa polovine energije (Half power energy)
2. Širina opsega idealnog filtera koji propušta istu količinu energije šuma kao realni filter

TIPOVI FILTERA



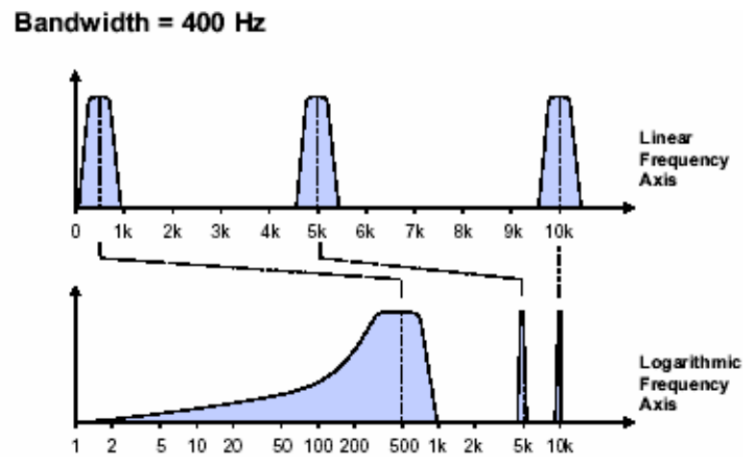
Sl.9. Filter konstantne širine opsega i filter konstantnog procenta širine opsega

Dva tipa propusnih filtera se koriste u frekvencionoj analizi:

1. Filteri konstantne širine opsega, kod kojih je širina opsega konstantna i ne zavisi od centralne frekvencije filtera
2. Filteri konstantnog procenta širine opsega (constant percentage bandwidth-CPB), gdje je širina opsega specificirana kao konstantan procenata oko neke centralne frekvencije, tj. opseg se povećava sa povećanjem centralne frekvencije. Ponekad se CPB filteri nazivaju filteri relativne širine opsega (Relative Bandwidth filters).

Filteri konstantne širine opsega

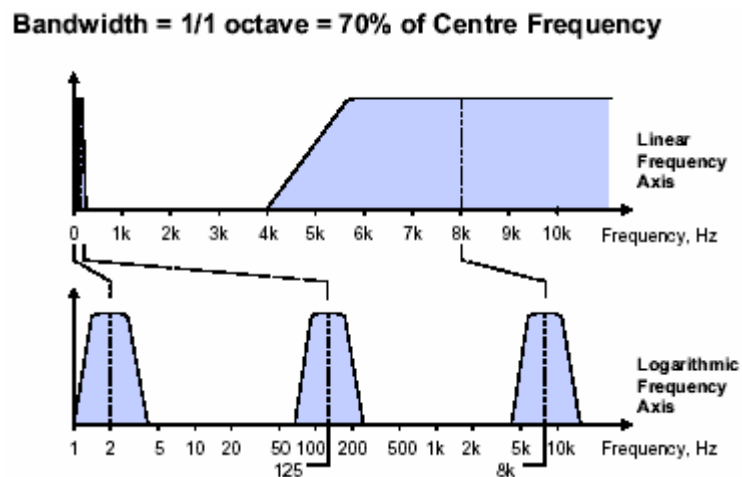
Kada se koriste filteri konstantne širine opsega preporučuje se korištenje linearne frekvencijske skale. Ukoliko se koristi logaritamska frekvencijska skala, prikaz frekvencijskog spektra nije adekvatan, što se vidi na slici.



Sl.10. Linearna skala se koristi za filtere konstantnog opsega

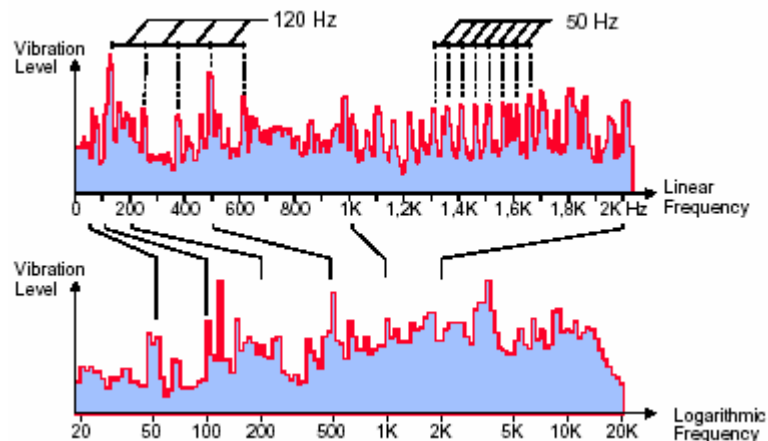
Filteri konstantnog procenta širine opsega (CPB)

Kada se koriste CPB filteri preporučuje se korištenje logaritamske frekvencijske skale. Ukoliko se koristi linearna frekvencijska skala, prikaz frekvencijskog spektra nije adekvatan, što se vidi na slici.



Sl.11. Logaritamska skala se koristi za filtere konstantnog procenta opsega

Linearna naspram logaritamske frekvencijske skale



Sl.12. Ispravno izabrana frekvencijska skala

Ako je izabrana prava kombinacija tipa filtera i frekvencijske skale, frekvencijski spektar izgleda kao na slici. Da bi znali koji je tip filtera korišten, dovoljno je pogledati na frekvencijsku skalu.

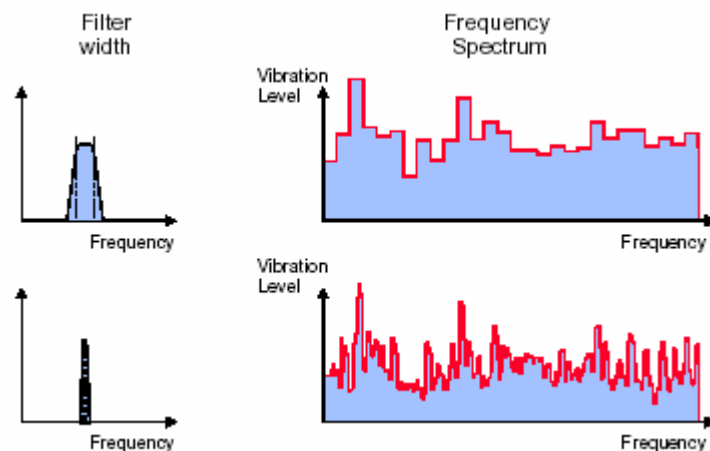
KOJI TIP FILTERA KORISTITI?

Izbor filtera zavisi od konkretne aplikacije.

Treba poštovati sljedeće pravilo:

- Frekvencijska analiza korištenjem filtera konstantnog opsega (i linearne skale) je u upotrebi kada je u pitanju mjerenje vibracija, zbog toga što signali sa mehaničkih struktura (posebno mašina) često sadrže serije harmonika i bočne komponente. To se najlakše identifikuje na linearnoj skali.
- Frekvencijska analiza korištenjem CPB filtera (i logaritamske skale) je u upotrebi kada je u pitanju akustičko mjerenje, zbog toga što daje puno bližu aproksimaciju reakcije ljudskog uha. Kada je u pitanju vibracijsko mjerenje, CPB filteri se koriste za mjerenje strukturalnih rezonancija, i za pregled stanja mašina (3 dekade se lako mogu pokriti sa CPB filterom).

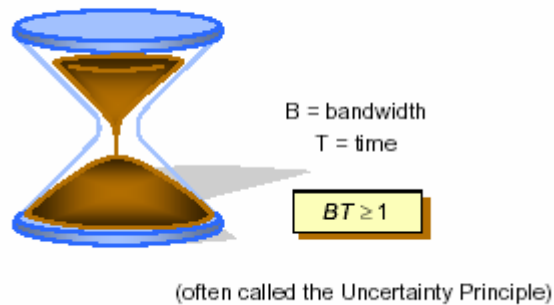
IZBOR ŠIRINE OPSEGA



Sl.13. Izbor širine opsega filtera

Što je uži korišteni opseg filtera, to je dobijena informacija detaljnija. Opseg filetra bira se tako da se najvažnije frekvencijske komponente mogu razlikovati jedna od druge. Ipak, opseg mora biti toliko širok da se analiza može izvršiti u razumnom vremenu. Što je analiza detaljnija (uži opseg), potrebno je duže vremena za analizu.

NAJVAŽNIJI PRINCIP FREKVENCIJSKE ANALIZE



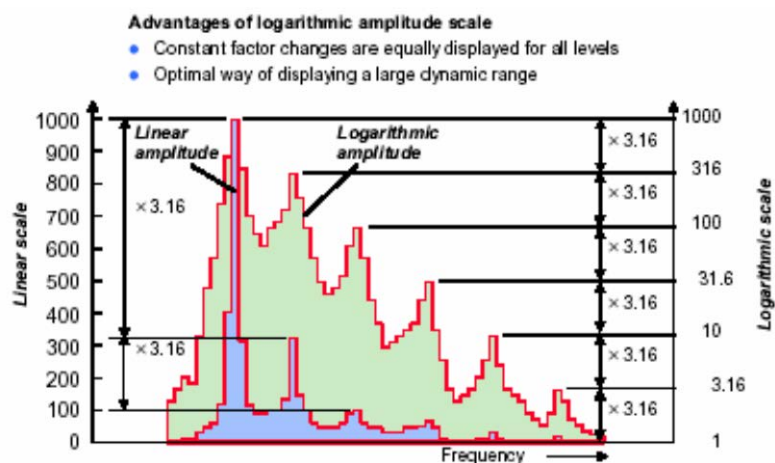
Sl.14. Princip nepouzdanosti

Proizvod BT

Zakon da je $BT \geq 1$ ukazuje da što je uži frekvencijski opseg (B), to je potrebno duže mjerno vrijeme (T), i ovaj princip je pri mjerenju uvijek ispoštovan.

Ovaj princip može se objasniti na sljedeći način: ako želimo znati ima li signala na frekvenciji od 1 Hz (tj. unutar perioda od 1 sekunde), potrebno je da protekne vrijeme najmanje jednog perioda signala prije no što možemo reći bilo šta.

AMPLITUDNA SKALA: LINEARNI ILI LOGARITAMSKI PRIKAZ?



Sl.15. Uporedni linearni i logaritamski prikaz amplituda vibracije

Linearna i logaritamska amplitudna skala

Čest je slučaj u frekvencijskoj analizi da frekvencijske komponente od interesa za analizu u vibracijskom spektru imaju puno manje amplitude od dominantnih komponenata. Niski nivoi amplituda se teško uočavaju na linearnoj skali. Logaritamski prikaz amplituda vibracija daje jednak naglasak frekvencijskim komponentama i niskih i visokih nivoa amplituda. Amplitudna skala može biti označena u mehaničkim jedinicama, kao što je ms^{-2} , ali je puno češće označavanje u dB.

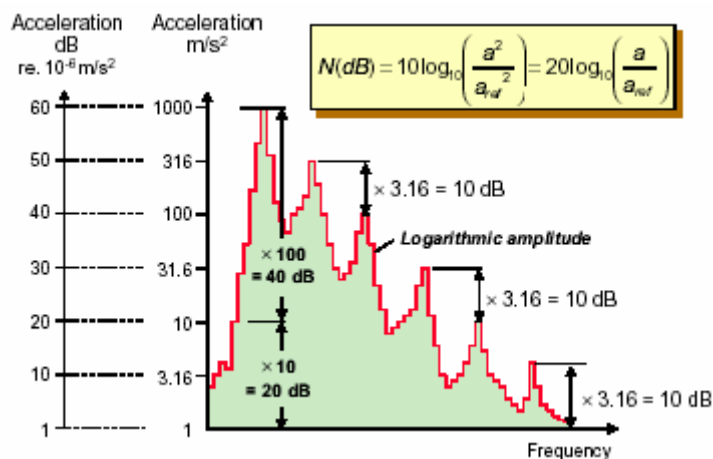
Zašto koristiti logaritamsku amplitudnu skalu?

Često se kritične vibracijske komponente dešavaju na niskim amplitudama. Ove komponente ne mogu se otkriti na linearnoj amplitudnoj skali zbog toga što su male amplitude "pritisnute" ka dnu skale. Međutim, logaritamska skala pokazuje istaknute vibracijske komponente jednako dobro pri bilo kojoj amplitudi. Čak šta više, procentualna promjena u amplitudi može se direktno očitati kao promjena u dB. Stoga se frekvencijska analiza buke i vibracija obično prikazuje na logaritamskoj amplitudnoj skali.

Dobijanje većeg broja podataka

Očigledna prednost korištenja logaritamske skale jeste preglednost puno većeg broja podataka, budući da ih se više može istovremeno vidjeti, a bez potrebe za mijenjanjem displeja. Prednost ovakvog prikaza je i smanjenje efekta slučajne fluktuacije, kako u signalu vibracija tako i u signalu buke.

dB (DECIBEL) SKALA

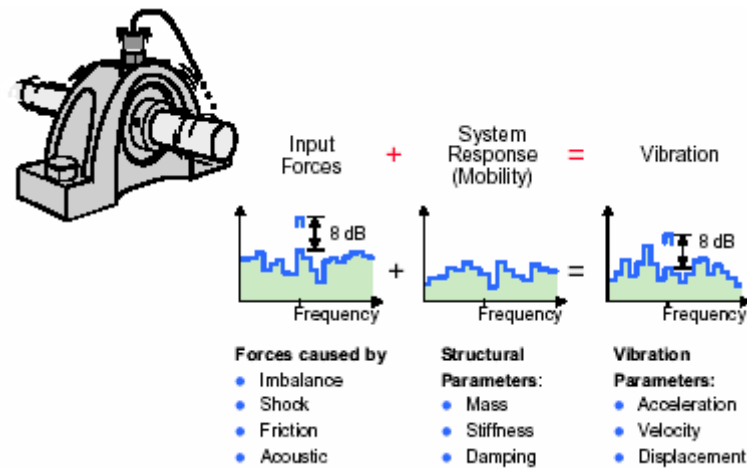


Sl.16. Amplituda vibracije iskazana u dB

dB (decibel) skala

Amplitudna skala sa jedinicama u dB smanjuje razmatrani numerički opseg normalne logaritamske skale na kompaktan linearni brojni sistem. Skala u dB je takva da je dati procentualni interval u, recimo, nivou ubrzanja predstavljen sa datim brojem decibela. Ovo je velika prednost kada radimo sa vibracionim signalima, budući da smo često zainteresovani za procentualnu promjenu u nivou vibracije, više nago za stvarni nivo. Nula decibela na dB skali može se izabrati za bilo koji nivo vibracija, npr. za 1ms^{-2} . Ipak, nivo ubrzanja od $a_0=10^{-6} \text{ms}^{-2}$ je međunarodno izabran kao referentni nivo za ubrzanje. (Treba biti oprezan jer neke vojne norme koriste nivo od 10^{-6}g kao referentni nivo).

PRENOŠENJE VIBRACIJA



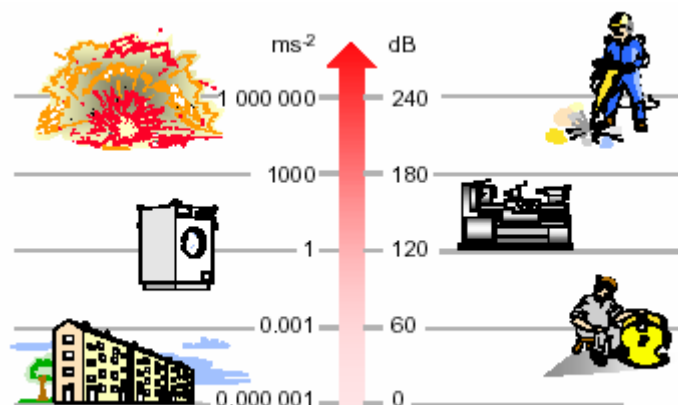
Sl.17. Veza vibracije sa pobudnom silom i krakteristikom sistema

Šta određuje amplitudu (magnitudu) vibracija?

U inženjerskoj praksi poznato je da se mjerenje vibracija obično izvodi uz određene kompromise. Bilo bi dobro kada bi se mogla direktno mjeriti sila koja uzrokuje vibracije, ali to je praktično nemoguće. Međutim, moguće je mjeriti rezultat djelovanja sile, a to su vibracije. Vibracijski spektar, pa čak i sveukupni nivo, je indirektno povezan sa spektrom sile i njenim ukupnim nivoom, pri čemu je veza ostvarena preko tzv. funkcije "pokretljivosti sistema" (mobility function).

Dijagram pokazuje interesantan fenomen funkcije "pokretljivosti" mehaničkog sistema. Spektar sile sadrži dominantan vrh na određenoj frekvenciji. Međutim, zbog toga što "pokretljivost" sistema ima "antirezonanciju" na toj frekvenciji, vibracijski spektar ne sadrži značajan vrh na toj frekvenciji. To pokazuje da ne trebamo biti zainteresovani samo za najveće vrhove u frekvencijskom spektru. Treba primjetiti da će povećanje sile za 8 dB rezultovati povećanjem vibracije za 8 dB.

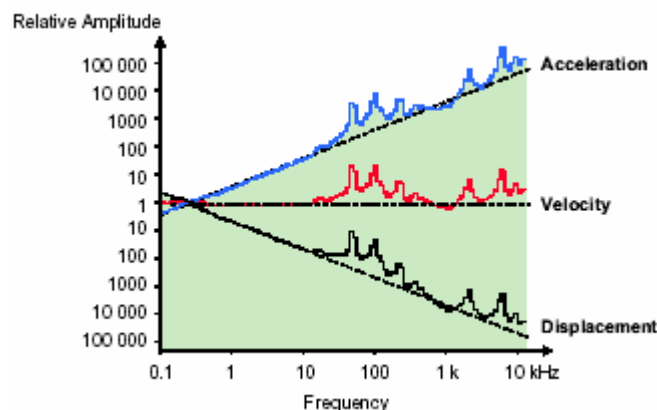
NIVOI VIBRACIJA "STVARNOG SVIJETA"



Sl.18. Nivoi vibracija različitih izvora vibracija

Koristeći piezoelektrične akcelerometre u mogućnosti smo da izmjerimo amplitude vibracija vrlo širokog dinamičkog opsega, koji iznosi gotovo $10^{11}:1$. Korištenjem skale u dB taj opseg se smanjuje na 220 dB. Dinamički opseg jednog akcelerometra je obično 10^8 .

VIBRACIJSKI PARAMETRI: POMAK, BRZINA, UBRZANJE



Sl. 19. Parametri vibracije: pomak, brzina, ubrzanje

Koji parametar izabrati za vrednovanje vibracije?

Ukoliko tip mjerenja kojeg treba izvesti ne precizira parametar kojeg treba mjeriti, npr. prema nekom standardu, opšte je pravilo da treba izabrati onaj parametar vibracije koji ima najravniji odgovor preko cijelog frekvencijskog opsega. Ovakav izbor parametra obezbjeđuje najveći dinamički opseg amplituda za cijelo mjerenje. Ako frekvencijski odgovor nije poznat, mjerenje treba započeti izborom brzine kao parametra mjerenja.

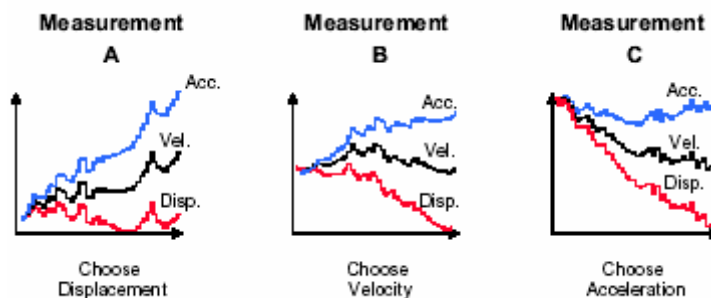
Ovo je jako važno budući da je najbolje izvoditi analizu signala koji ima najravniji spektar. Ako spektar nije prihvatljivo ravan, učešće komponenata koje leže dosta ispod srednjeg nivoa biće manje primjetno. Za slučaj sveukupnog mjerenja, manje komponente mogu proći skroz neopaženo.

U praksi se najčešće kao davači za mjerenje signala vibracije koriste akcelerometri, kojim se mjeri ubrzanje kao parametar vibracije. Prednost akcelerometra je u tome što električni signal može da biti integraljen i tako dati signale brzine i pomaka. Poznato je da je proces integraljenja neke funkcije povoljniji za eletroničke instrumente nego proces diferenciranja, te je to razlog za preporuku mjerenja ubrzanja kao parametra vibracija.

Koristiti parametar sa najravnijim spektrom

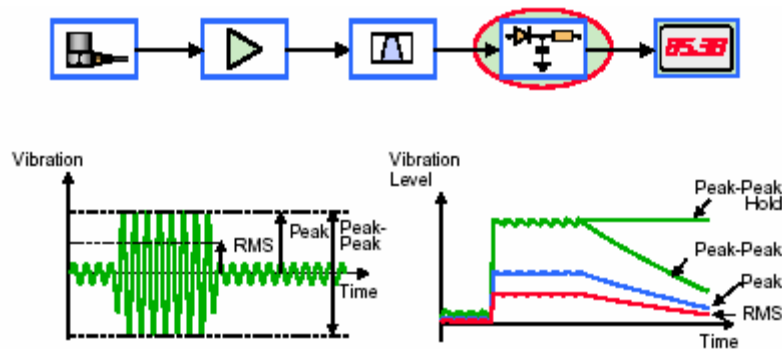
Preporuka da se za mjerenje koristiti parametar sa najravnijim spektrom u većini slučajeva može značiti da se izabere brzina kao parametar mjerenja. Pri nekim mjerenjima može biti pogodno i ubrzanje, iako većina mašina ima veliko vibraciono ubrzanje samo na visokim frekvencijama. Rijetkost je postojanje spektra pomaka koji je ravan preko cijelog frekvencijskog opsega, dok je vrlo često slučaj da mašina ima velika vibracijska pomjeranja na niskim frekvencijama.

Pošto je teško ustanoviti početno stanje frekvencijskog spektra, najbezbjednije je izvesti mjerenje brzine (ali koristeći akcelerometar, budući da čak integraljen signal ubrzanja sa akcelerometra daje bolji dinamički i frekvencijski opseg nego signal davača brzine).



Sl.20. Izbor parametra mjerenja

DETEKTOR / OSREDNJIVAČ SIGNALA



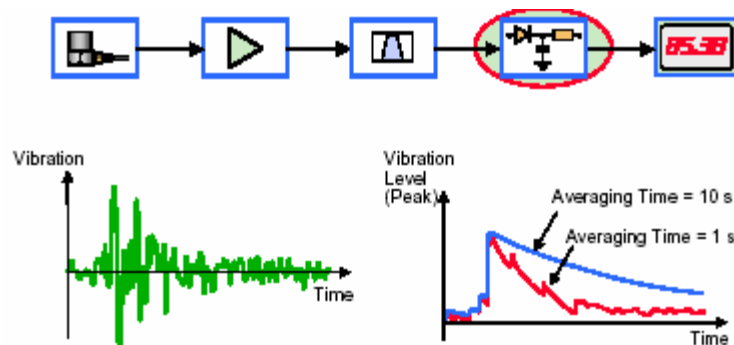
SI.21. Osrednjavanje signala vibracije

Konačna karika u mjernom lancu prije samog displeja jeste detektor/osrednjivač, koji pretvara vibracijski signal u nivo koji može biti prikazan na displeju.

Prikazani primjer pokazuje izlazni nivo (RMS, Peak, Peak-Peak ili max.) za sinusoidni signal konstantne amplitude primjenjen na ulazu.

Treba primjetiti kako izlazni nivo signala opada kada dođe do skokova ulaznog signala usljed njegove fluktuacije. Količina fluktuacije i opadanje signala su određeni izabranim vremenom osrednjavanja.

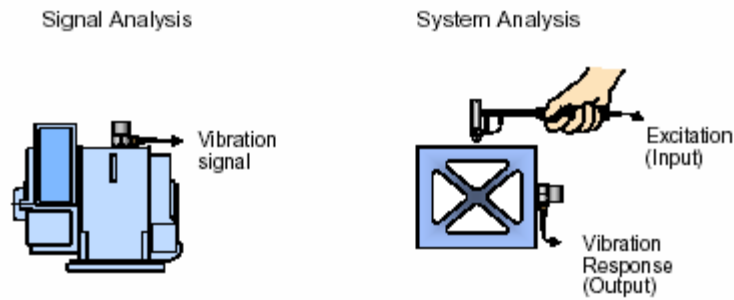
VRIJEME OSREDNJAVANJA



SI.22. Vrijeme osrednjavanja signala

Ukoliko je vrijeme osrednjavanja kratko, detektor će vrlo blisko slijediti nivo varirajućeg ulaznog signala, u nekim slučajevima čineći otežanim očitavanje na displeju. Ako se koristi duža vremenska konstanta može doći do gubitka nekih informacija, što je posebno bitno ako signal sadrži neke impulse.

ANALIZA SIGNALA NASUPROT ANALIZE SISTEMA



Sl.23. Analiza signala i analiza sistema

Analiza signala

U većini prethodnih primjera bilo je pretpostavljeno da je postojeća vibracija sistema na neki način generisana silom prisutnom u samom sistemu. Kada se analizira signal takve vibracije govorimo o analizi signala.

Analiza sistema

Tokom razvoja novih konstrukcija, a u nekim slučajevima i pri ispitivanju već postojeće konstrukcije, postavlja se zahtjev za izgradnjom modela strukture, na takav način da ako je zadana ulazna sila treba izračunati izlaznu vibraciju.

Primjer pokazuje mjerenje funkcije “pokretljivosti” mehaničkog sistema (mobility) primjenom sile na različitim lokacijama strukture i istovremenim mjerenjem veličine ulazne sile i izlaznog odgovora strukture, tj. vibracije. Ovakav tip mjerenja primjenjuje se za pravljenje modalnog modela strukture, koji se potom može koristiti za predviđanje ponašanja strukture podvrgnute određenom opterećenju. Model se takođe može koristiti da bi se predvidjeli efekti nekih izmjena na strukturi, posebno ako se model kombinuje sa MKE modelom (modelom konačnih elemenata). Ovaj tip analize se naziva analiza sistema.

OSNOVNI KONCEPT ZVUKA

(“Basic concept of sound”, Bruel&Kjaer)

Rezime

U ovoj lekciji objašnjeni su zvuk i mjerenje zvuka preko veličina zvučnog pritiska, nivoa zvuka i jedinica za mjerenje nivoa zvuka.

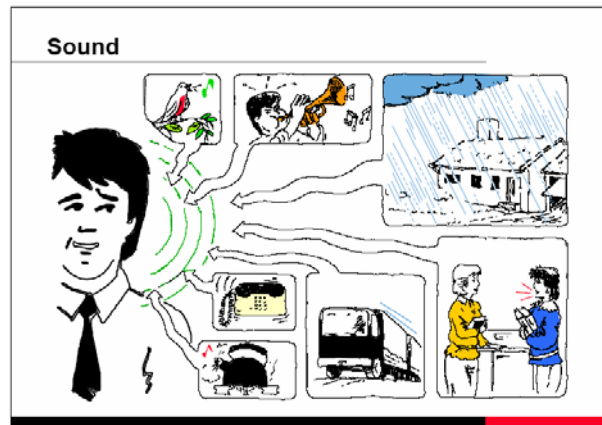
Prije no što se izvede mjerenje zvuka, važno je upoznati terminologiju akustike, osnovna pravila propagacije zvuka, kao i vrste mjerne opreme.

Ova lekcija opisuje zvučni pritisak, nivo zvuka, jedinice za mjerenje nivoa zvuka, kao i način dodavanja i oduzimanja nivoa.

Sadržaj

- Definicije
- dB konverzije
- Tipovi zvučnih polja
- Dodavanje i oduzimanje nivoa buke

ZVUK

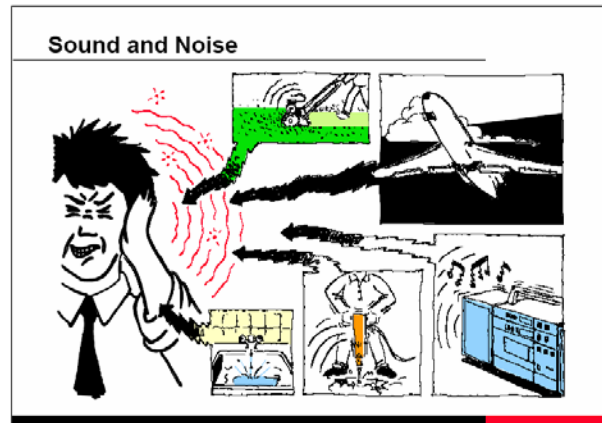


Zvuk je sastavni dio svakodnevnog života. Toliko smo naviknuti na različite zvučne podražaje koje primamo iz okoline da nedovoljno cijenimo značaj zvuka i njegovu ulogu.

Zahvaljujući zvuku u mogućnosti smo doživjeti vrlo ugodne događaje poput muzike ili pjevanja ptica. Zvuk nam omogućava govornu komunikaciju i može nas upozoravati ili držati opreznim, npr. kada telefon zvoni ili kad svira sirena.

Zvuk nam takođe omogućava da vršimo kvalitetno ocjenjivanje i dijagnosticiranje stanja različitih sistema, npr. zvuk ventila upozorava na oštećenje motora automobila, škriputanje točka može upozoriti na potencijalnu opasnost, dok šum srca omogućava dijagnosticiranje zdravlja ovog vitalnog ljudskog organa.

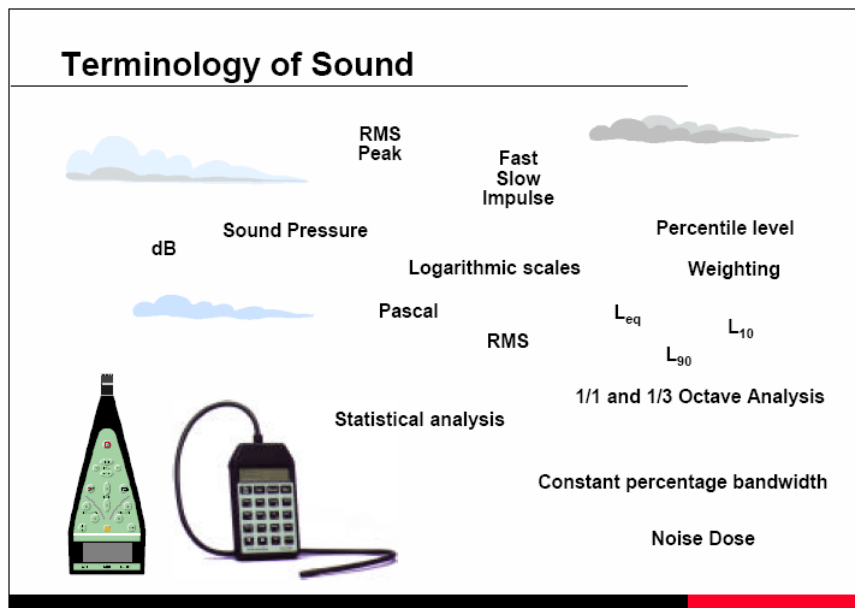
ZVUK I BUKA



Međutim, u današnjem modernom društvu česti su zvukovi koji izazivaju uznemiravanje i nelagodu. Mnoge zvukove subjektivno doživljavamo kao neprijatne ili neželjene- takve zvukove nazivamo buka. Ipak, nivo uznemiravanja zvukom ne zavisi samo od kvaliteta zvuka, nego i od našeg stava spram toga. Na primjer, u nekoj vrsti muzike neki ljudi uživaju, dok je drugi smatraju bukom, posebno ako je glasna. Zvuk čak ne treba biti previše glasan da bi bio neprijatan. Škripa parketa, oštećen muzički CD ili povremeni zvuk kapanja vode može biti isto toliko neprijatan i uznemiravajući kao i glasna grmljavina. Prosuđivanje o glasnosti zvuka takođe zavisi od doba dana. Na primjer, visok nivo buke će se tolerisati tokom dana, ali ne i noću.

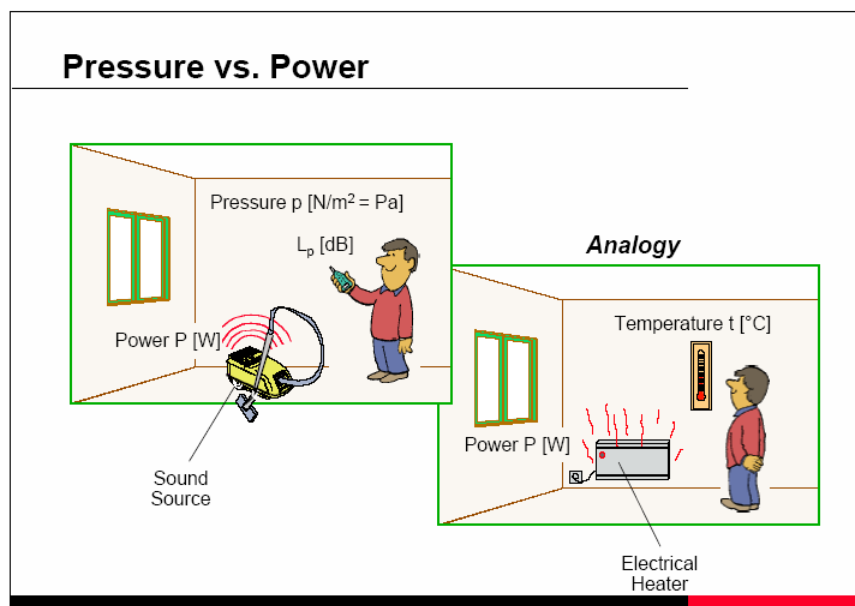
Buka, stoga, predstavlja zvuk kojem osim fizičkog treba pridodati i psihofiziološki aspekt tumačenja. Zvuk svojim djelovanjem može da ošteti i uništi. Zvuk eksplozije može slomiti prozore i protresti malter na zidu. Ipak, najtragičniji slučaj oštećenja usljed zvuka je kada zvuk ošteti vrlo sofisticiran mehanizam dizajniran da bi bio prijemnik zvuka-ljudsko uho.

TERMINI U VEZI SA ZVUKOM



Zvuk se definiše kao promjena pritiska koju ljudsko uho može registrovati, a opseg zvuka se kreće od jedva čujnog nivoa do nivoa koji može oštetiti ljudsko uho. Nauka o zvuku naziva se akustika i bavi se fizičkim aspektom zvuka: stvaranjem zvuka, propagacijom i prijemom zvuka, bilo da je proizveden i priman od strane čovjeka ili mašina i mjernih instrumenata. Buka je neizbježni dio svakodnevnog života, a tehnološki razvoj savremenog čovječanstva je rezultirao povećanjem nivoa buke produkovane od mašina, fabrika, saobraćaja, itd. Stoga je vrlo važno preduzeti korake u smislu redukovanja nivoa buke, tako da buka nije nešto na šta se moramo navići. Da bi se problem buke tretirao na odgovarajući način neophodno je izvođenje pouzdanog mjerenja buke. Ipak, prije no što se izvede mjerenje, moraju se poznavati terminologija i osnovni principi mjerenja buke.

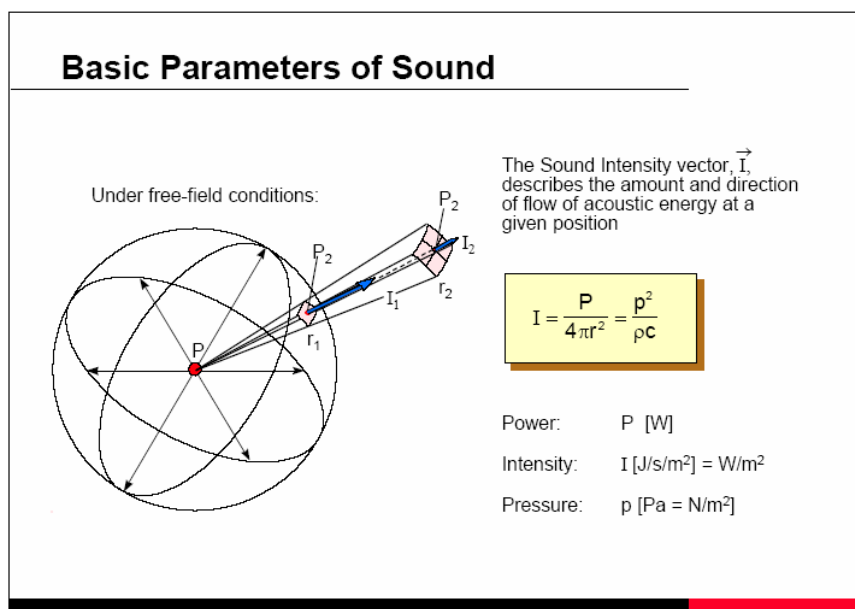
ZVUČNI PRITISAK I ZVUČNA SNAGA



Prije opisivanja karakteristika zvuka kao fizičke veličine, pogodno je ukazati na analogiju između zvuka i toplote kao možda poznatije fizičke veličine. Električni grijač proizvodi određenu količinu toplotne energije u jedinici vremena [J/s], tj. ima određenu snagu izraženu u vatima [$W=J/s$]. Snaga grijača je osnovna mjera koja pokazuje koliko toplote grijač može proizvesti i ne zavisi od okruženja. Toplota se rasprostire od izvora podižući temperaturu okoline, a temperatura se može izmjeriti termometrom u konkretnoj tački prostorije koju zagrijavamo. Međutim, kolika će temperatura biti izmjerena ne zavisi samo od toplotne snage grijača i rastojanja između tačke u prostoriji i grijača, nego i od količine toplote koju će apsorbovati zidovi i toplote koja će se prenijeti kroz zidove i prozore u okolinu, itd.

Zvučni izvor proizveće određenu količinu zvučne energije u jedinici vremena [J/s], tj. izvor zvuka ima određenu zvučnu snagu iskazanu u vatima [$W=J/s$]. Zvučna snaga je osnovna mjera toga koliko akustičke energije izvor može proizvesti i ne zavisi od okruženja. Zvuk se rasprostire od izvora mijenjajući pritisak vazduha u prostoriji. Koliki će nivo zvuka biti izmjereno ne zavisi samo od zvučne snage izvora i njegovog rastojanja od određene tačke u prostoriji, nego i od količine zvučne energije koju će apsorbovati zidovi i koja će se prenijeti kroz zidove i prozore u okolinu, itd.

OSNOVNI PARAMETRI ZVUKA



Kada izvor zvuka proizvede zvuk određene zvučne snage, P , zvučna energija se prenosi od izvora na susjedne molekule vazduha koji ispunjava prostor. Energija se prenosi na vanjske molekule šireći se od izvora zvuka poput talasanja površine vode. Količina zvučne energije koja prolazi određenim pravcem kroz određenu površinu naziva se intenzitet zvuka, I . Energija koja prolazi kroz određenu tačku prostora uzrokuje porast pritiska, p , u toj tački. Gustina vazduha je označena sa ρ , dok c označava brzinu prostiranja zvuka kroz vazduh. Treba istaknuti da je intenzitet zvuka vektorska veličina, jer je definisan intenzitetom, pravcem i smjerom.

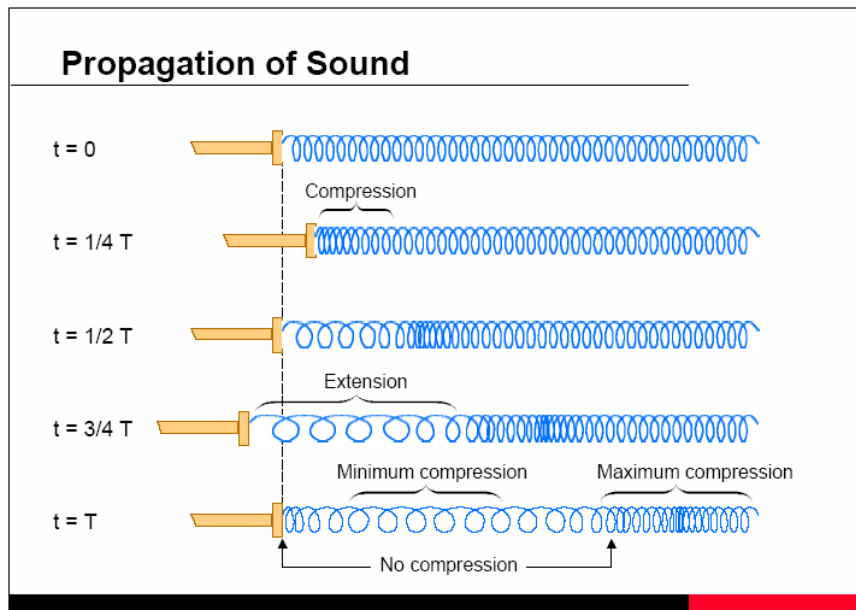
Intenzitet zvuka i zvučni pritisak su akustičke veličine koje se mogu direktno izmjeriti korištenjem odgovarajućih instrumenata. Zvučna snaga se može izračunati iz izmjerenih vrijednosti zvučnog pritiska i intenziteta zvuka i poznate vrijednosti površine po kojoj je vršeno mjerenje.

Zvučna snaga kao akustički parametar se koristi u ocjenjivanju nivoa buke različitih mašina, uređaja i sl., tj. omogućava poređenje različitih mašina sa aspekta emitovane buke.

Intenzitet zvuka kao akustički parametar se koristi za lociranje izvora buke i određivanje nivoa buke.

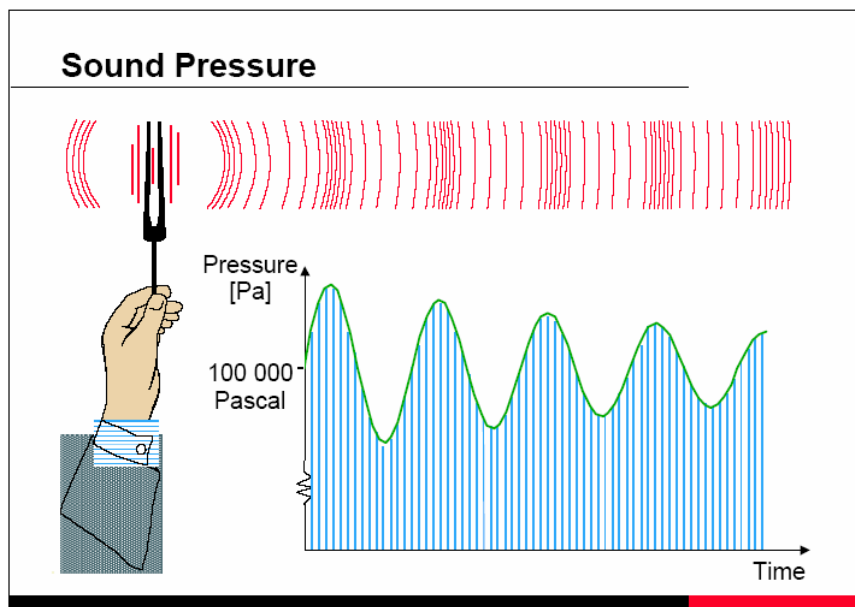
Zvučni pritisak je najvažniji parametar za ocjenjivanje štetnog djelovanja buke na čovjeka.

PROPAGACIJA ZVUKA



Propagacija zvuka kroz vazduh može se prikazati na primjeru opruge: ako oprugu sabijemo, kompresija se prenosi duž opruge. Slično se dešava sa molekulama vazduha koje se sabijaju i šire, tj. promjena pritiska molekula vazduha u vidu “kompresija” i “širenje” putuje kroz vazduh.

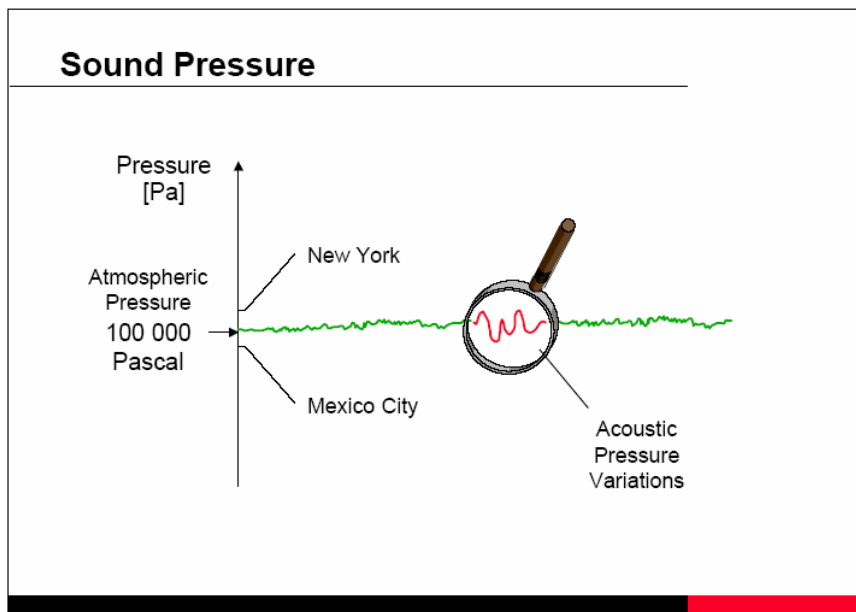
ZVUČNI PRITISAK



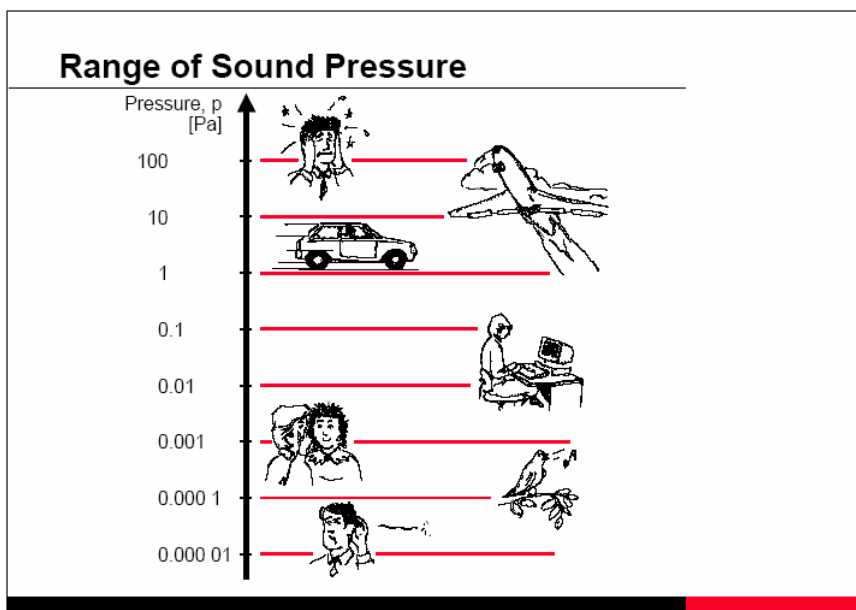
Kada izvor zvuka vibrira, npr. zvučna viljuška, te vibracije dovode do promjene pritiska u okolnom vazduhu. Emitovanje tih varijacija pritiska može se uporediti sa talasanjem vode koje nastaje kada u vodu ubacimo kamen. Talasi se radijalno šire od mjesta na kojem smo ubacili kamen. Međutim, sama voda se ne kreće od toga centra, nego ostaje gdje jeste krećući se gore-dole i proizvodeći kružne talase na površini vode.

Zvučni talas se ponaša na sličan način, a može se uspostaviti analogija tako da je kamen izvor zvuka, voda predstavlja vazduh, a talasanje vode odgovara širenju zvučnog talasa kroz vazduh.

Vibracije zvučnog pritiska superponiraju se sa statičkim pritiskom okolnog vazduha koji ima vrijednost oko 10^5 Pa.

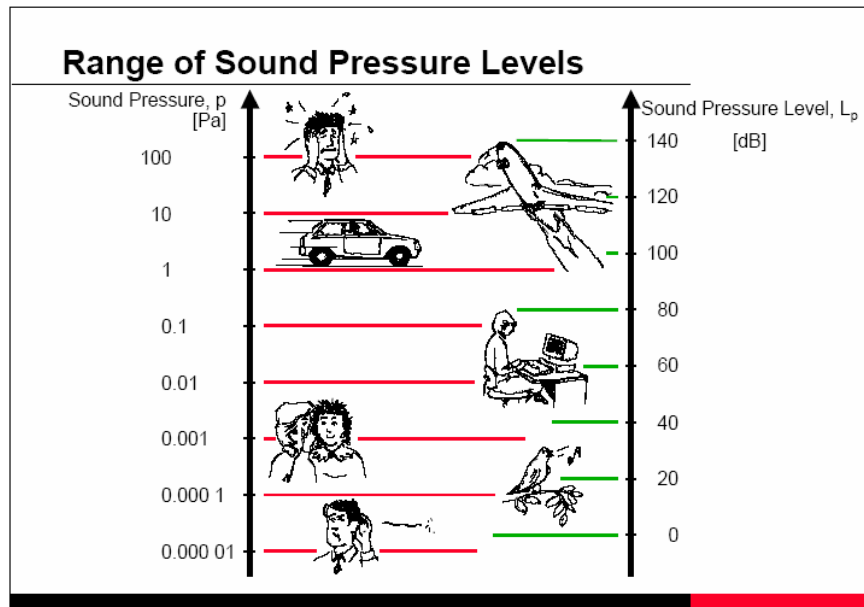


NIVO ZVUČNOG PRITISKA



Poredeći sa vrijednostima statičkog pritiska vazduha, čujne varijacije zvučnog pritiska imaju vrlo mali opseg koji se kreće od $20 \mu\text{Pa}$ (10^{-6} Pa) do 100 Pa. Najmanja vrijednost zvučnog pritiska koju ljudsko uho može registrovati je $20 \mu\text{Pa}$, te se ova vrijednost pritiska naziva *prag čujnosti*. Zvučni pritisak nivoa 100 Pa je toliko glasan da izaziva bol, te se ova vrijednost pritiska naziva *granica bola*. Odnos između ovih ekstremnih vrijednosti zvučnog pritiska je veći od $10^6:1$. Direktna primjena linearne skale u paskalima za iskazivanje vrijednosti zvučnog pritiska proizvela bi upotrebu enormno velikih i nezgrapnih brojeva. Pored toga, ljudsko uho ne odgovara linearno na zvučne podražaje nego logaritamski. Iz ovih razloga, uvidjelo se da je puno praktičnije izraziti akustičke parametre logaritamskim odnosom izmjerene veličine pritiska p i referentne vrijednosti pritiska $p_0=20 \mu\text{Pa}$. Jedinica za ovaj logaritamski odnos veličina pritiska je decibel [dB].

NIVO ZVUČNOG PRITISKA: LINEARNA I dB SKALA



Prednost korištenja dB-skale se jasno vidi uporednim prikazom sa linearnom skalom. Linearna skala sa svojim velikim brojevima konvertovana je u mnogo podesniju skalu, gdje nivoi pritiska pokrivaju opseg od 0 dB na pragu čujnosti do 130 dB na granici bola.

DECIBEL (dB)

dB – decibel

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ dB re } 20 \mu\text{Pa}$$

$$(p_0 = 20 \mu\text{Pa} = 20 \times 10^{-6} \text{ Pa})$$

<p>Ex. 1: $p = 1 \text{ Pa}$</p> $L_p = 20 \log \frac{1}{20 \times 10^{-6}}$ $= 20 \log 50\,000$ $= 94 \text{ dB}$	<div style="background-color: green; width: 10px; height: 100px; margin: 0 auto;"></div>	<p>Ex. 2: $p = 31.7 \text{ Pa}$</p> $L_p = 20 \log \frac{31.7}{20 \times 10^{-6}}$ $= 20 \log 1.58 \times 10^6$ $= 124 \text{ dB}$
---	--	---

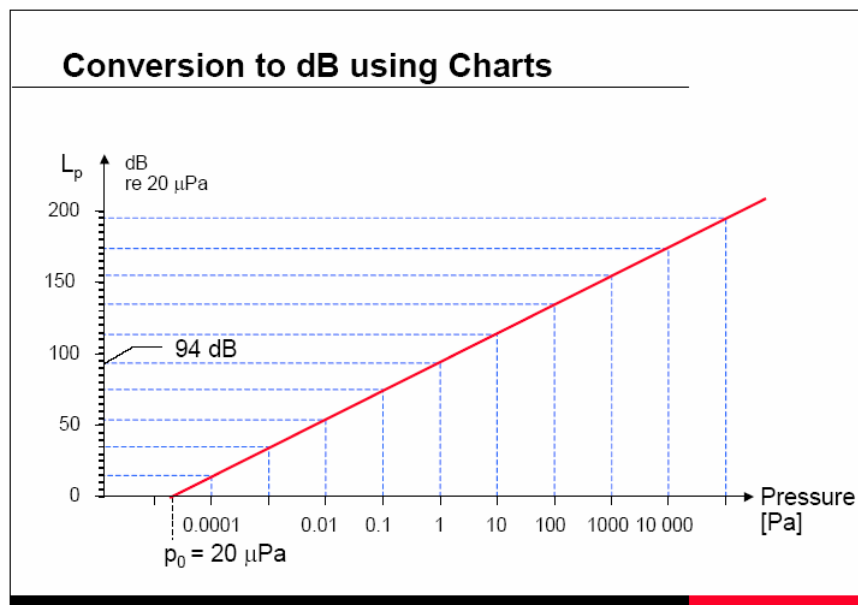
Nivo zvučnog pritiska, L_p , definisan je logaritamskom vrijednošću količnika izmjerenog zvučnog pritiska p i referentne vrijednosti pritiska p_0 koja odgovara pragu čujnosti, $20 \mu\text{Pa}$, što je pokazano na gornjoj slici. Riječ nivo pridodata je zvučnom pritisku da bi označila da veličina ima određenu vrijednost iznad referentnog nivoa, a simbol za nivo je L_p .

Slika pokazuje dva primjera korištenja formule za računanje nivoa pritiska u dB. Nivoi pritiska od $L_p=94 \text{ dB}$ i $L_p=124 \text{ dB}$ su interesantna zbog toga što se koriste kao nivoi za kalibraciju mjernih instrumenata.

PERCEPCIJA NIVO ZVUKA

Perception of dBs	
Change in Sound Level (dB)	Change in Perceived Loudness
3	Just perceptible
5	Noticeable difference
10	Twice (or 1/2) as loud
15	Large change
20	Four times (or 1/4) as loud

Da bi ljudsko uho percipiralo postojanje razlike nivoa između dva zvuka, neophodno je da razlika nivoa iznosi najmanje 3 dB (tome odgovara promjena pritiska od 1.4 puta), ali za tu promjenu može se reći da je tek jedva primjetna. Promjena od 5 dB je primjetna promjena nivoa zvuka. Promjena od 10 dB ili 3.16 puta veći pritisak primjećuje se kao dvostuko glasnjiji zvuk. Promjena od 15 dB je značajna promjena nivoa zvuka, dok se promjena od 20 dB primjećuje kao četiri puta glasnjiji zvuk. Međutim, ne postoji linearna veza između nivoa glasnosti zvuka u dB i ljudske percepcije.

KONVERZIJA PRITISKA (Pa) U NIVO (L_p)

Umjesto korištenja formule za izračunavanje nivoa pritiska u dB, moguće je konverziju izvesti korištenjem jednostavnog grafikona. Prikazani grafikon baziran je na referentnoj vrijednosti pritiska od 20 μPa , a primjer pokazuje konverziju pritiska od 1 Pa u nivo od 94 dB.

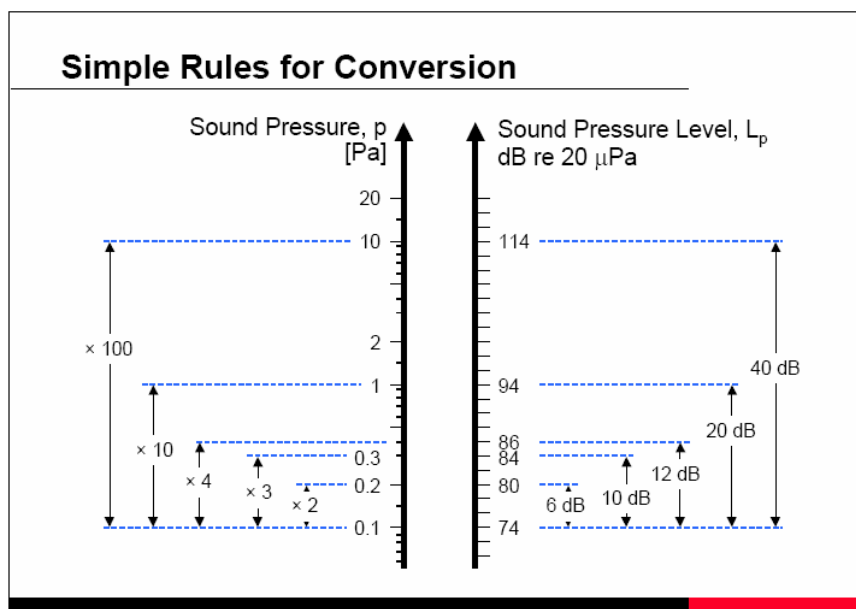
Konverzija se može izvršiti i korištenjem tabelarnih vrijednosti pritiska i odgovarajućih nivoa. Treba primjetiti da postoje i pozitivne i negativne vrijednosti nivoa u dB. Pri poređenju dva izmjerena pritiska, ukoliko je vrijednost referentnog pritiska manja od druge izmjerene vrijednosti, onda je nivo (pressure ratio) u dB pozitivnog predznaka, i obrnuto.

Conversion to dB using Tables

dB to Pressure Ratio

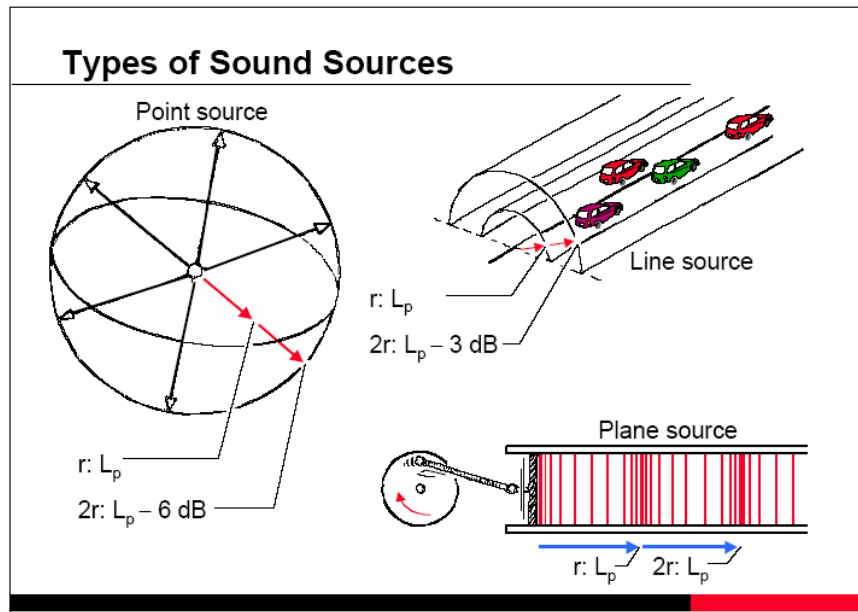
Pressure Ratio	- db +	Pressure Ratio	Pressure Ratio	- db +	Pressure Ratio
1.00	0.0	1.000	0.501	6	1.995
0.989	0.1	1.012	0.447	7	2.239
0.977	0.2	1.023	0.398	7	2.512
0.966	0.3	1.035	0.355	9	2.818
0.955	0.4	1.047	0.316	10	3.162
0.944	0.5	1.059	0.251	12	3.981
0.933	0.6	1.072	0.200	14	5.012
0.923	0.7	1.084	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

JEDNOSTAVNA PRAVILA KONVERZIJE



Onima koji se bave mjerenjem zvuka obično je korisno poznavati neka „ključna pravila“ za konverziju između linearnih vrijednosti i dB vrijednosti. Najkorisnije od tih aproksimativnih vrijednosti su prikazane na slici.

TIPOVI IZVORA ZVUKA



Fizička akustika definiše tri tipa izvora zvuka: sferni (tačkasti) izvor, linijski izvor i izvor ravanskih talasa.

Zvučni talas emitovan iz sfernog izvora prostire se u obliku sfere radijalno u svim pravcima. Ako je dimenzija izvora manja od talasne dužine emitovanog zvuka, govorimo o tačkastom izvoru zvuka.

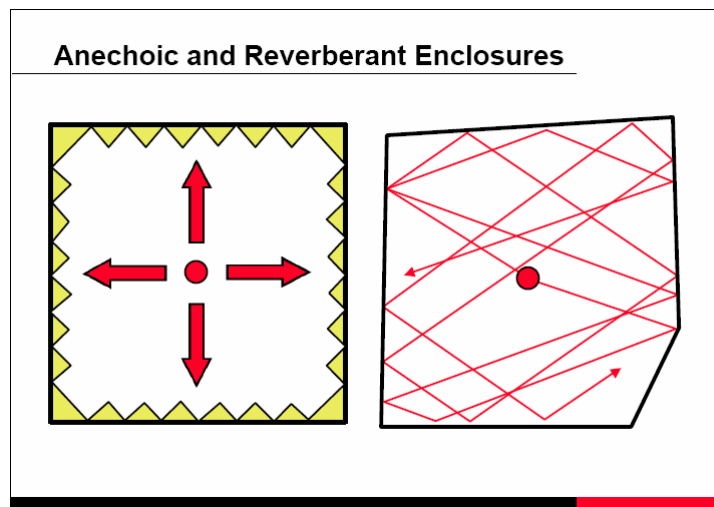
Za sferni (tačkasti) izvor važi da zvučni pritisak opada na polovinu vrijednosti kada se razdaljina od izvora udvostruči, što odgovara padu nivoa zvučnog pritiska za 6 dB.

Drugi tip izvora je linijski izvor, npr. cijev kroz koju struji turbulentni fluid ili put sa intenzivnim saobraćajnim tokom. Za linijski tip izvora zvučni pritisak opada za oko 3 dB pri udvostručenju rastojanja od izvora, zbog toga što se zvuk širi od izvora poput talasnog fronta koji je okomit na liniju izvora.

Tip izvora koji se najrjeđe sreće jeste izvor ravanskih talasa. Primjer može biti klip od kojeg se zvučna energija prostire unutar idealno glatke i krute cijevi stvarajući ravne talase u cijevi. Pretpostavljajući da nema gubitaka energije kroz zidove cijevi, intenzitet tj. akustička energija koja se kreće kroz cijev ne zavisi od rastojanja od izvora. Kako je intenzitet zvuka jednak svugdje u cijevi, nivo zvučnog pritiska neće opadati sa povećanjem rastojanja od klipa.

TIPOVI ZVUČNIH POLJA

Anehoična i reverberaciona prostorija

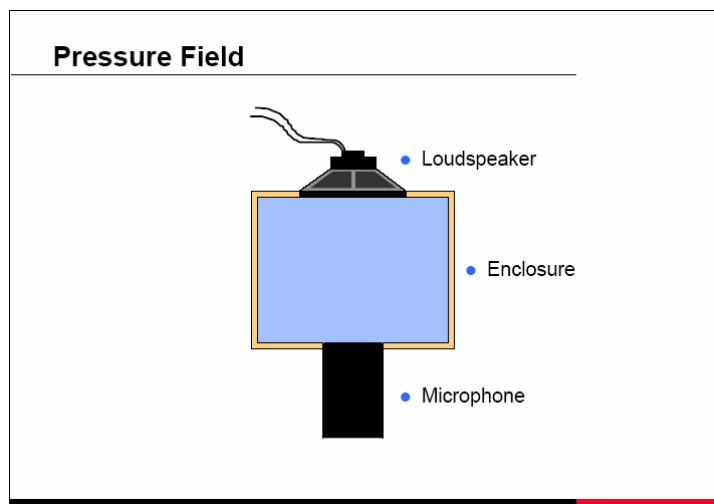


Zvučna energija ne može se uvijek slobodno širiti od izvora zvuka kroz prostor. Kada zvuk koji se širi kroz prostoriju dostigne granične površine, npr. zidove, pregrade ili pod, dio energije se reflektuje a dio se apsorbira ili prenosi kroz prepreke.

U prostoriji sa vrlo reflektujućim površinama, sva zvučna energija će se reflektovati i uspostaviće se tzv. difuzno polje sa uniformno raspoređenom zvučnom energijom. Ovakva prostorija naziva se reverberaciona prostorija.

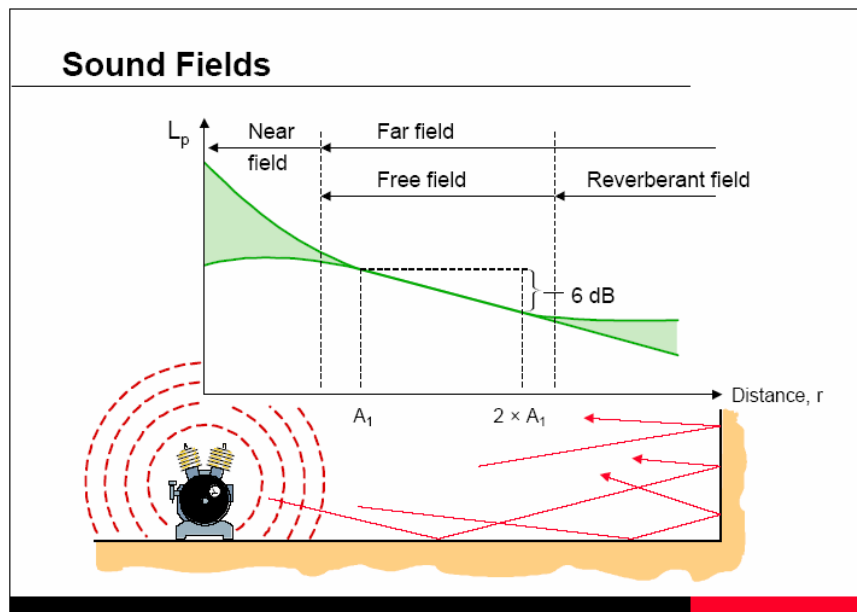
U prostoriji sa visoko apsorbujućim površinama sva energija biće apsorbovana od strane površina i zvučna energija će se širiti od izvora kao da je izvor u slobodnom polju. Ovakva prostorija naziva se anehoična soba.

Polje pritiska



U polju pritiska gdje je talasna dužina zvuka velika poredeći sa dimenzijama okruženja (krajnjih granica polja), pritisak je uniformno raspoređen unutar tih granica. Ovo polje se koristi kod kalibratora gdje je egzaktni zvučni pritisak primjenjen unutar datih granica okruženja.

RAZLIČITA ZVUČNA POLJA U PRAKSI

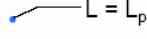


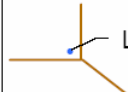


U praksi, većina mjerenja zvuka se izvodi u prostorijama koje nisu anehoične niti reverberacione nego negdje između. To otežava pronalaženje korektna mjernog položaja u kojoj treba izvršiti mjerenje buke emitovane od datog izvora. Uobičajeno je podijeliti oblast oko izvora zvuka, npr. mašine, u četiri različita polja: blisko polje, daleko polje, slobodna polje, reverberaciono polje.

Blisko polje jeste oblast vrlo blizu mašine gdje nivo zvučnog pritiska može značajno varirati usljed male promjene pozicije. Ovo područje se proteže do rastojanja koje je manje od talasne dužine zvuka najniže frekvencije emitovanog iz mašine kao izvora zvuka. Pošto je prije izvođenja mjerenja teško znati kakav je frekvencijski sadržaj zvuka i koja je to komponenta zvuka koja ima najnižu frekvenciju, preporuka je da se za granicu bliskog polja uzima rastojanje dvosrtno veće od najveće dimenzije mašine. Mjerenje nivoa buke u ovom području treba izbjegavati.

Daleko polje izdijeljeno je na slobodno polje i reverberaciono polje. Unutar slobodnog polja zvuk se ponaša kao na otvorenom prostoru bez reflektujućih površina koje bi interfereirale sa propagacijom zvuka. Ovo znači da u tom području nivo zvuka opada za 6 dB sa udvostručenjem rastojanja od izvora. U reverberacionom polju, refleksije od zidova i drugih objekata mogu biti isto toliko jake kao i direktan zvuk sa mašine. Stoga je nivo buke treba mjeriti u slobodnom polju.

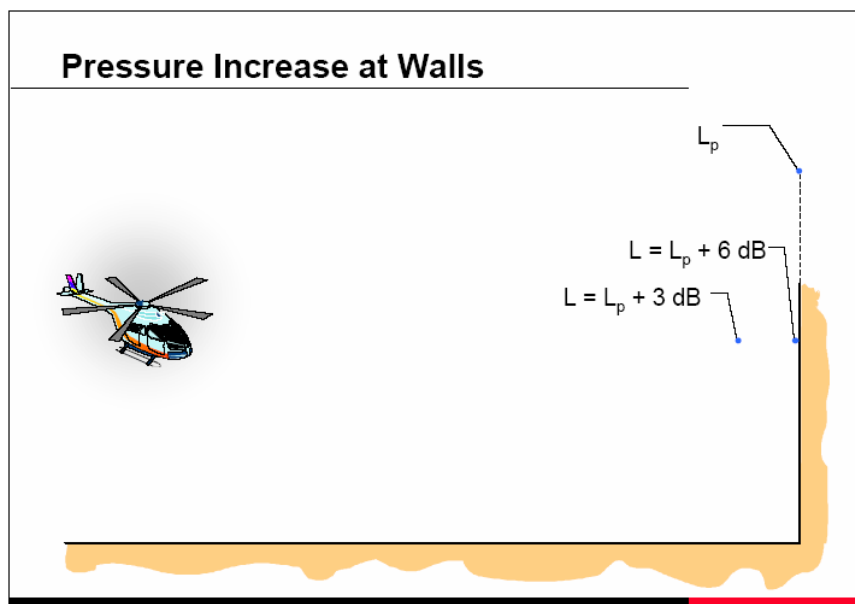
INDEKS DIREKTIVNOSTI

Directivity Index			
Source Location	Directivity Factor	Directivity Index, dB	
Free field	1	0	 $L = L_p$
On a flat plane	2	3	 $L = L_p + 3 \text{ dB}$
At a junction of two planes	4	6	 $L = L_p + 6 \text{ dB}$
At a junction of three planes	8	9	 $L = L_p + 9 \text{ dB}$

Ako je izvor zvuka blizu ravnoj površini radijacija energije će ići preko polusfere kao da se izvor zvuka reflektuje sa površine. Sa dvije reflektujuće površine emisija će biti slična $\frac{1}{2}$ polusfere, a sa 3 reflektujuće površine emisija je slična $\frac{1}{4}$ spolusfere. Zvučni pritisak zavisi od broja refleksija i njihovih magnituda.

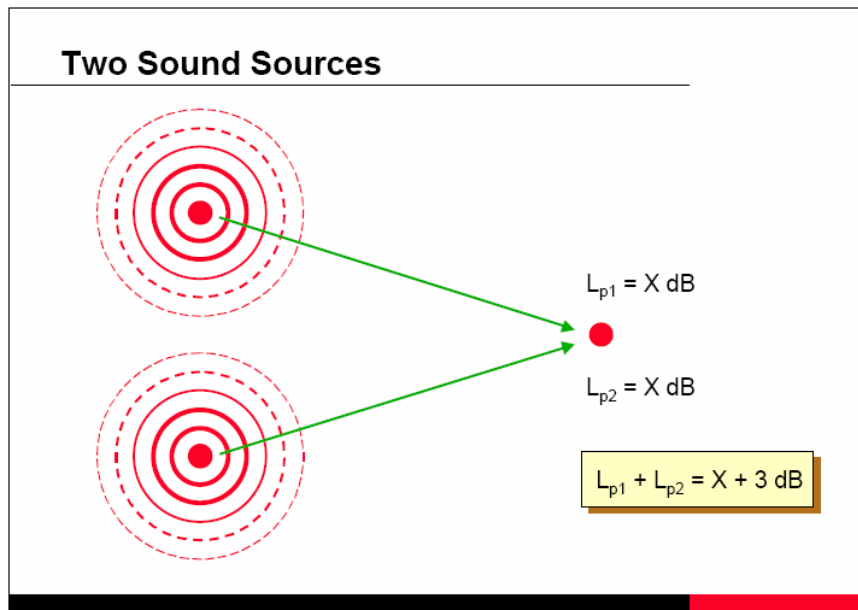
Zvuk ima factor direktivnosti Q i odgovarajući indeks direktivnosti (dB).

PRITISAK RASTE UZ ZIDOVE



Zvučni pritisak L_p u blizini reflektujuće površine biće preslikan kao u ogledalu i može se smatrati da postoje dva zvučna pritiska sa istim magnitudama i fazama. Stoga će zvučni pritisak u blizini površine biti udvostručen, a u tom slučaju nivo iznosi $L=L_p+6\text{dB}$.

REZULTUJUĆI ZVUK DVA ISTA IZVORA. DODAVANJE NIVOA BUKE



Kada dva zvučna izvora zrače zvučnu energiju, onda oba učestvuju u rezultujućem nivo zvučnog pritiska mjenenom na nekom rastojanju od izvora zvuka. Ako zrače istu količinu energije, a razmatra se prijemna tačka na ekvidistantnom rastojanju od oba izvora, tada će intenzitet zvuka u datoj tački biti dvostruko veći nego kad imamo samo jedan izvor. Kako je intenzitet zvuka proporcionalan kvadratu pritiska, onda udvostručenje intenziteta rezultira u povećanju zvučnog pritiska za $\sqrt{2}$ što odgovara povećanju nivoa za 3 dB.

Treba primjetiti da rezultujući nivo dva ili više izvora nije prosta numerička suma individualnih dB vrijednosti. Razlog je u tome što se zvuk proistekao iz više izvora kombinuje na energetskom principu. U primjeru, ako je nivo zvuka jednog izvora $x=50 \text{ dB}$, onda je rezultujući nivo zvuka oba izvora 53 dB.

Ukoliko se nivoi zvuka komponentnih izvora razlikuju, onda se rezultujući nivo nalazi tako da se izračunaju intenziteti zvuka pojedinačnih izvora, potom se nalazi rezultujući intenzitet prostim sumiranjem intenziteta komponentnih izvora, i na kraju iz rezultujućeg intenziteta i referentne vrijednosti za intenzitet zvuka $I_0=10^{-12} \text{ W/m}^2$ izračuna se rezultujući nivo zvuka:

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

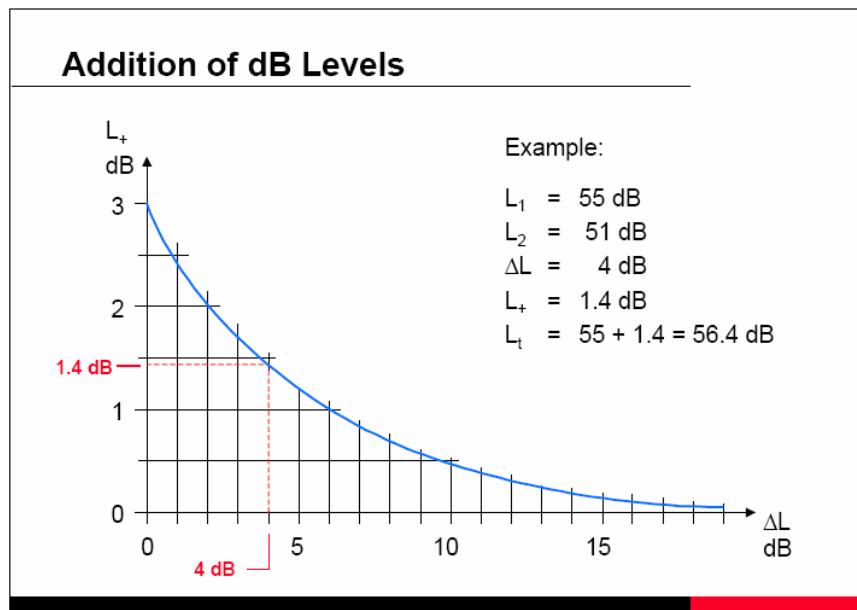
$$L_2 = 10 \log \frac{I_2}{I_0} \Rightarrow I_2 = I_0 10^{\frac{L_2}{10}}$$

$$I_R = I_1 + I_2 \Rightarrow L_R = 10 \log \frac{I_R}{I_0}$$

Rezultujući nivo zvuka više različitih izvora pojedinačnih nivoa L_i može se odrediti i direktno iz formule:

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

Grafikon za sabiranje nivoa buke



Neka su poznati nivoi komponentnih izvora zvuka L_1 i L_2 . Rezultujući nivo zvuka se određuje prema sljedećem:

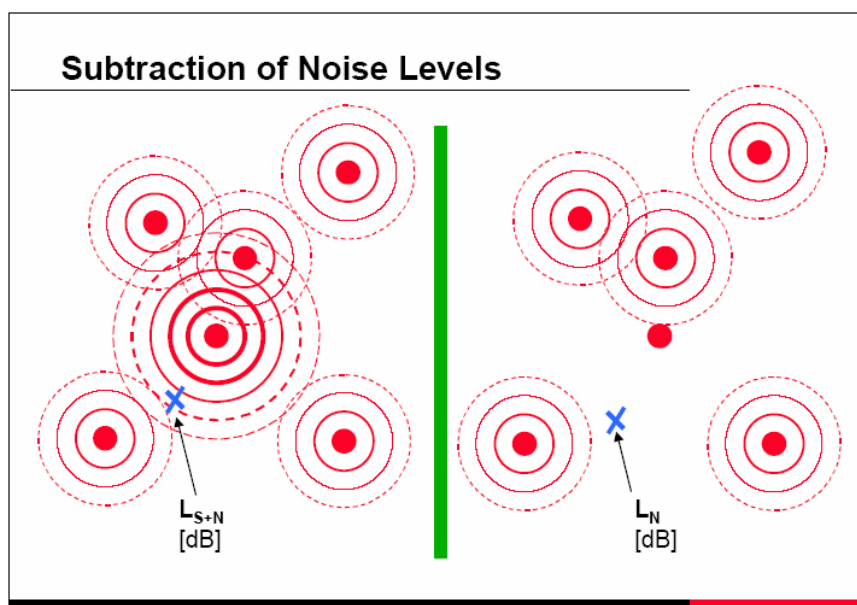
1. Izračunati razliku nivoa, $\Delta L = L_1 - L_2$, ova dva izvora;
2. Iz grafikona, za izračunato ΔL , odrediti L_+ ;
3. Dodati očitane vrijednosti L_+ nivou koji ima veću vrijednost da bi dobili ukupni nivo L_t .

U prikazanom primjeru rezultujući nivo iznosi $L_t = 56.4 \text{ dB}$.

Treba uočiti da razlici nivoa $\Delta L = 0$ odgovara dodavanje $L_+ = 3 \text{ dB}$. Ovo je upravo situacija kada imamo dva ista komponentna izvora jednakih nivoa zvuka $L_1 = L_2$ (prethodni primjer).

Međutim, ukoliko je razlika nivoa zvuka komponentnih izvora veća od 10 dB , učešće manje bučnog izvora je zanemarljivo u ukupnom nivou buke, tj. jači izvor dominira u ukupnom, tj. rezultujućem nivou.

ODUZIMANJE NIVOVA BUKE



U nekim slučajevima potrebno je izvršiti oduzimanje nivoa zvuka. To se može desiti kada je npr. potrebno odrediti nivo buke određene mašine u prisustvu buke koja potiče od ostalih mašina, tzv. pozadinske buke. Pri tome je potrebno znati da li taj nivo potiče od mašine, od pozadinske buke ili je kombinovan. Procedura je sledeća:

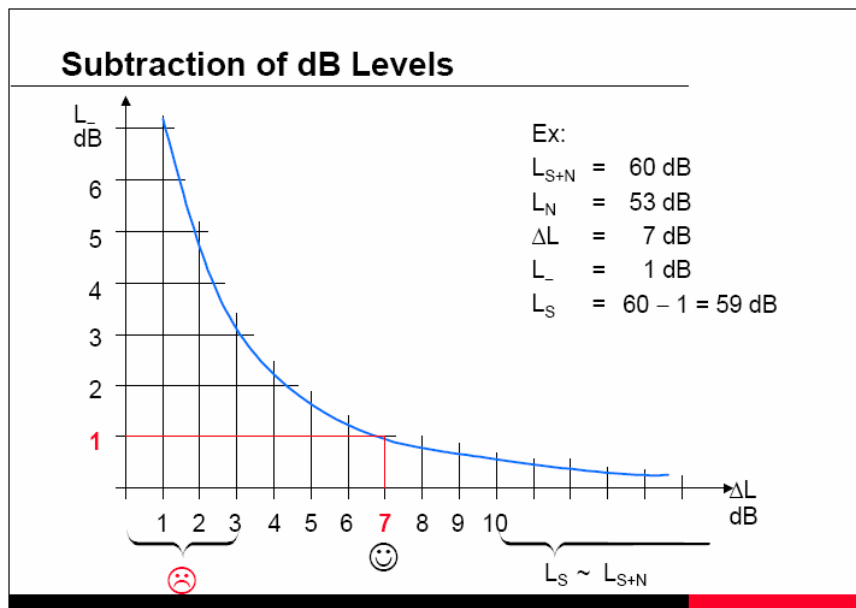
1. Izmjeriti kombinovani efekat buke mašine i pozadinske buke, tj. ukupnu buku L_{S+N} ;
2. Isključiti datu mašinu i izmjeriti pozadinsku buku, L_N . U većini slučajeva može se izvesti isključivanje date mašine, dok je jako teško isključiti svu ostalu pozadinsku buku.
3. Izračunati razliku $\Delta L = L_{S+N} - L_N$, a onda za izračunato ΔL u grafikonu očitati vrijednost L_s . U prikazanom primjeru za $\Delta L=7$ dB iz grafikona se očita $L_s=1$ dB.
4. Konačno, vrijednost L_s oduzeti od nivoa ukupne buke L_{S+N} , i tako definisati nivo buke date mašine, $L_s = L_{S+N} - L_s$.

Ako je razlika nivoa ΔL manja od 3 dB, pozadinska buka je suviše visoka za tačno mjerenje i korektan nivo buke ne može se naći sve dok se pozadinska buka ne smanji. Ako je, s druge strane, razlika nivoa ΔL veća od 10 dB, pozadinska buka se može zanemariti. Ako je razlika između 3 i 10 dB može se pronaći korektan nivo buke iz priloženog grafikona za oduzimanje nivoa buke.

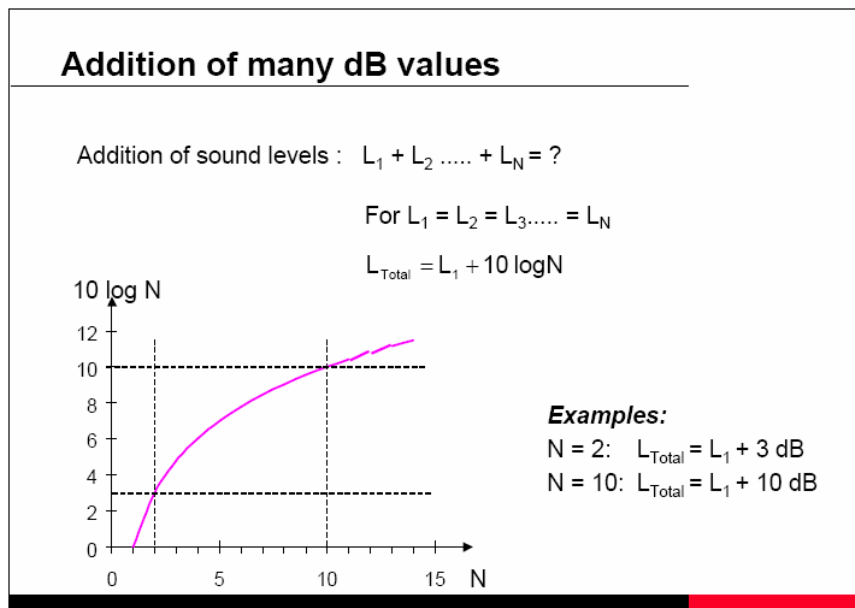
Nivo buke date mašine, L_s , može se izračunati korištenjem formule ako je poznat nivo ukupne buke, L_{S+N} , i ako je poznat nivo pozadinske buke, L_N :

$$L_s = 10 \log \left(10^{\frac{L_{S+N}}{10}} - 10^{\frac{L_N}{10}} \right)$$

Grafikon za oduzimanje nivoa buke



REZULTUJUĆI NIVO BUKE VIŠE IZVORA



Sabiranje nivoa buke više izvora vrši se prema formuli:

$$L_{Total} = 10 \log (10^{0.1L_1} + 10^{0.1L_2} + 10^{0.1L_3} + \dots + 10^{0.1L_n}) = 10 \log (\Sigma 10^{0.1L_i})$$

Ukoliko su svi izvori buke jednakih akustičkih karakteristika, onda se može koristiti kriva za određivanje vrijednosti koju je potrebno dodati pojedinačnom nivou da bi se dobio rezultujući nivo. Prvi primjer pokazuje da je za 2 jednaka izvora potrebno dodati 3dB na nivo pojedinačnog izvora da bi se izračunao rezultujući nivo buke. Drugi primjer pokazuje da je za 10 jednakih izvora potrebno dodati 10 dB na pojedinačni nivo kako bi se izračunao rezultujući nivo buke.

OSNOVI FREKVENCIJSKE ANALIZE ZVUKA

(“Basic Frequency Analysis of Sound”, Brule&Kjaer)

Rezime

Ova lekcija sadrži tri cjeline:

- Frekvencija i talasna dužina zvuka
- Frekvencijska analiza zvuka
- Percepcija zvuka

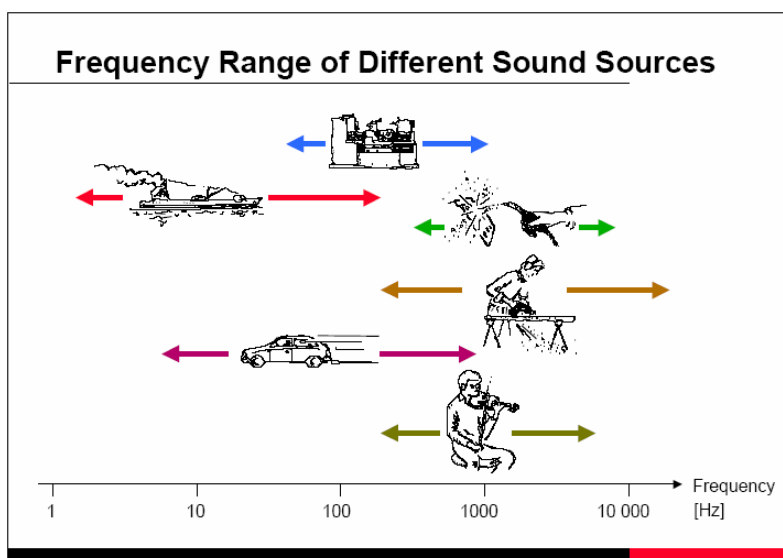
Kroz ove tri cjeline data su osnovna objašnjenja mjerenja nivoa zvuka i njegove frekvencijske analize. Objasnjena je struktura osnovnog instrumenta za analizu zvuka, a to je mjerač nivoa zvuka.

Ishod lekcije

Ovom lekcijom obezbjeđujeu osnovna znanja u vezi sa:

- Pojmovima koji se odnose na frekvencijski opseg čujnog zvuka i talasnu dužinu zvuka
- Difrakciju, refleksiju i difuziju zvuka
- Frekvencijsku analizu korištenjem FFT i digitalnih filtera
- Osnovni koncept 1/1 i 1/3 oktavnih filtera
- Ljudsku percepciju zvuka i značenje težinskih funkcija A, B, C, D
- Tok i analizu signala u mjeraču nivoa zvuka

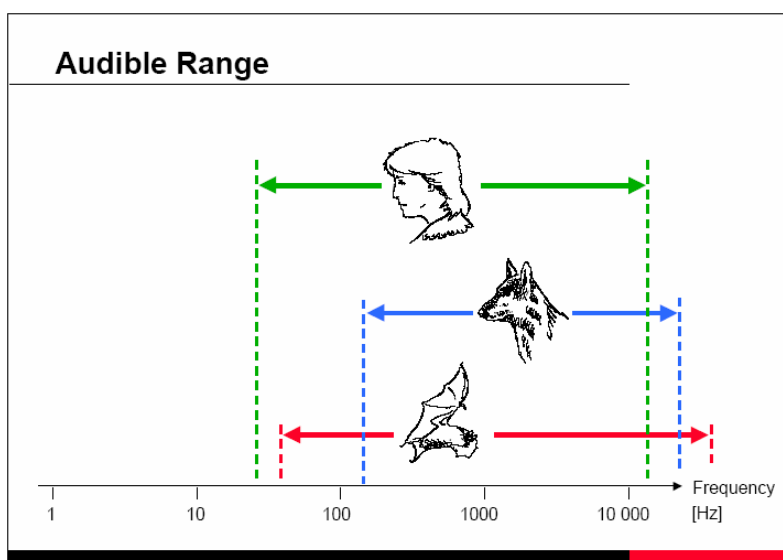
FREKVENCIJSKI OPSEG RAZLIČITIH IZVORA ZVUKA



Frekvencijski opsezi zvukova emitovanih iz različitih izvora koji okružuju savremenog čovjeka znatno se razlikuju. Čovjek može registrovati zvuk čije frekvencije leže u opsegu od 20 Hz do 20 kHz, što predstavlja frekvencijski opseg čujnog zvuka. Zvuk čija je frekvencija manja od 20 Hz naziva se infrazvuk, a zvuk čija je frekvencija veća od 20 kHz naziva se ultrazvuk. Ljudsko uho ne može registrovati zvukove koji leže u infrazvučnom i ultrazvučnom području, ali ovakvi zvukovi mogu uticati na druga ljudska čula i izazvati nelagodu.

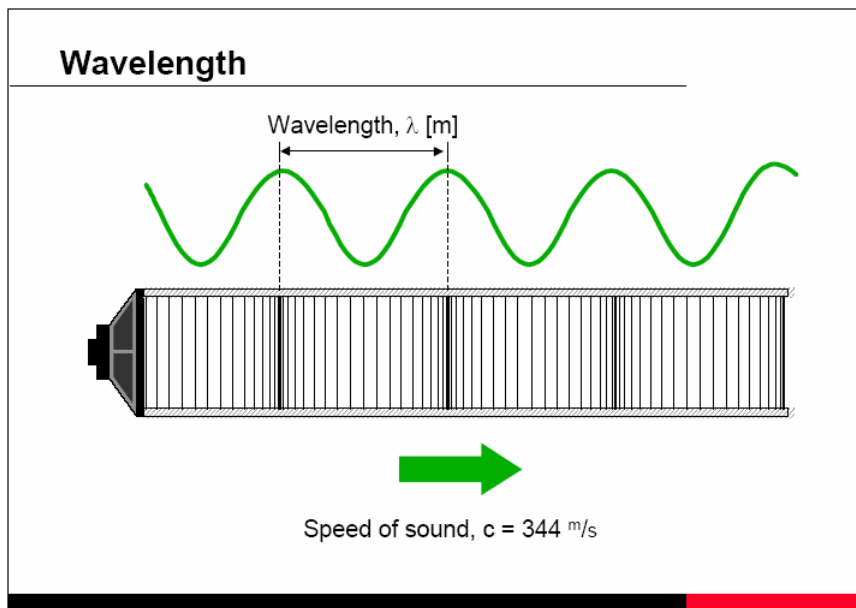
Primjeri izvora zvuka prikazani na slici ukazuju na činjenicu da nijedan od prikazanih izvora ne pokriva čitav čujni frekvencijski opseg. Iz tog razloga je važno poznavanje frekvencijskog opsega zvuka i vršenje frekvencijske analize.

ČUJNI OPSEG ZVUKA



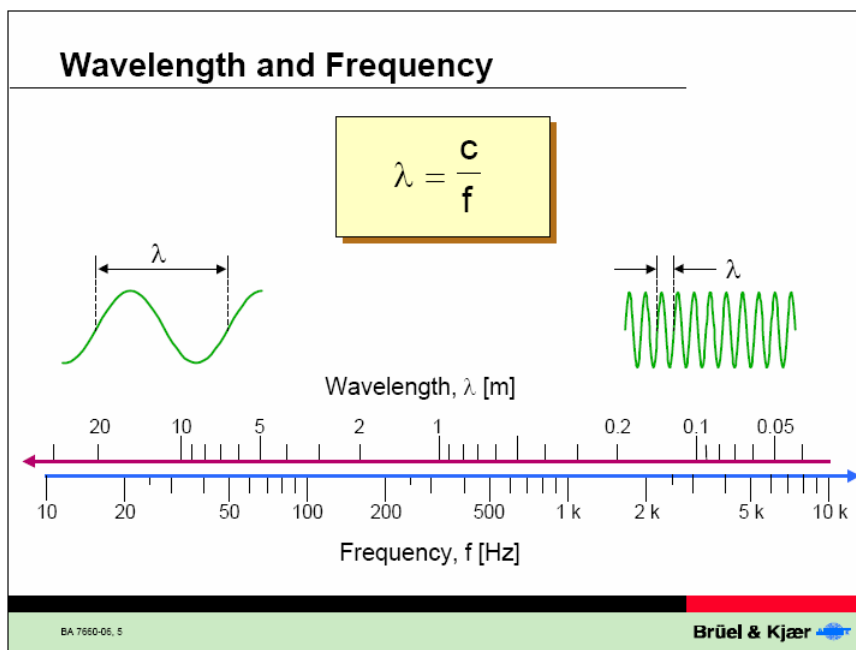
Kao što se može vidjeti, opseg čujnog zvuka za ljude, sa krajnjim granicama koje se odnose na mlade ljude, kreće se između 20 Hz i 20 kHz. Starenjem ljudi gube sposobnost prijema zvuka visokih frekvencija, tj. percepcija visokih frekvencija rapidno opada. Ukoliko je čovjek tokom života izložen vrlo visokim nivoima zvučnog pritiska, sluh može biti ozbiljno oštećen, uzrokujući smanjenu čujnost zvukova koji imaju nizak nivo. Oštećenje sluha se može odnositi i na samo određeni pojas frekvencija.

TALASNA DUŽINA



Zvučni signal emitovan iz zvučnika montiranog na jednom kraju cijevi proizveće zvučni talas koji propagira unaprijed brzinom od 344 m/s. Ukoliko je signal prosti sinusni signal, zvučni talas će sadržati brojne minimume i maksimume amplitude pritiska koji su razdvojeni rastojanjem jedne talasne dužine.

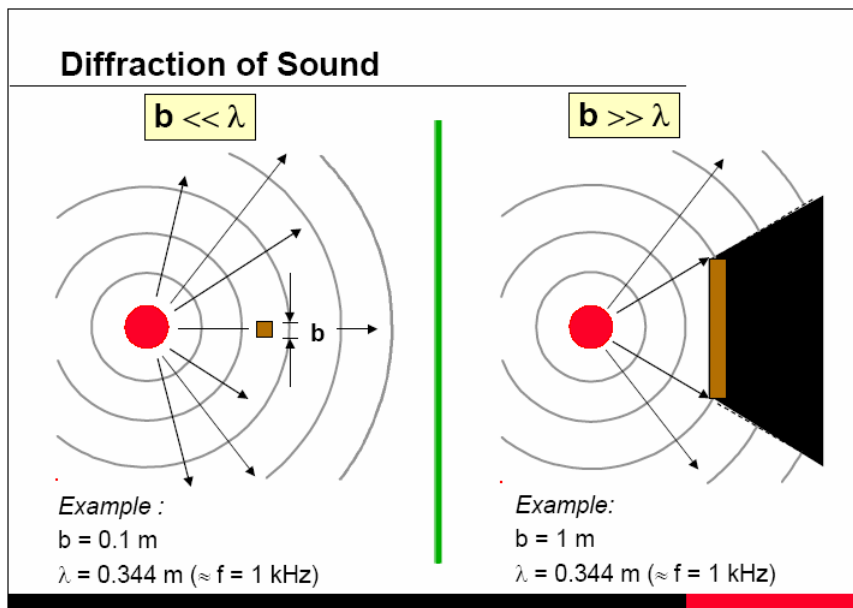
TALASNA DUŽINA I FREKVENCIJA ZVUKA



Talasna dužina, brzina zvuka i frekvencija su u međusobnom odnosu prikazanom formulom na slici.

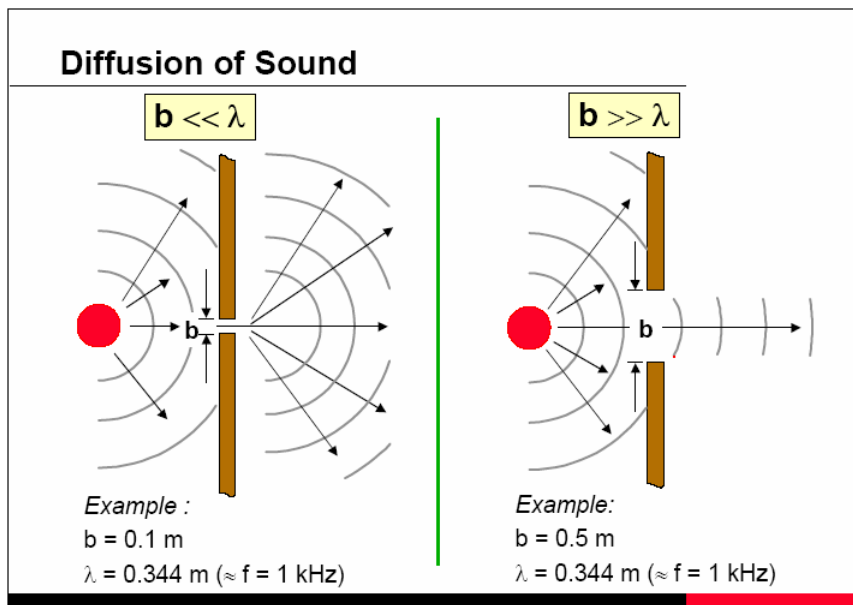
Očigledno je da su talasna dužina i frekvencija zvuka u obrnuto proporcionalnom odnosu: što je veća frekvencija-manja je talasna dužina, i obrnuto. Na primjer, zvuk frekvencije 1 kHz ima talasnu dužinu blizu 34 m, zvuk frekvencije 20 Hz ima talasnu dužinu oko 17 m, a na frekvenciji od 20 kHz talasna dužina iznosi samo 1.7 cm.

DIFRAKCIJA ZVUKA



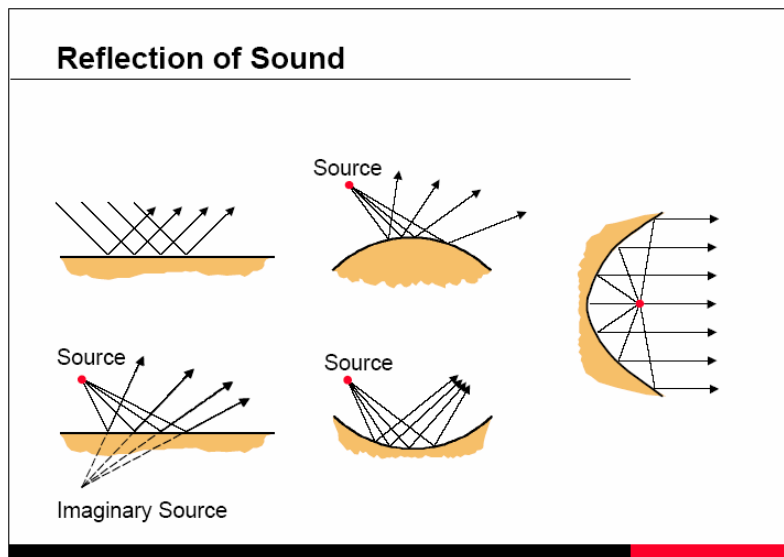
Objekti postavljeni u zvučnom polju mogu uzrokovati difrakciju. Potrebno je uporediti veličinu prepreke sa talasnom dužinom zvučnog polja da bi se odredila veličina difrakcije. Ako je veličina prepreke manja od talasne dužine, onda se prepreka može zanemariti. Ako je veličina prepreka veća od talasne dužine, nastaje efekat koji se može opisati kao efekat sjenke.

DIFUZIJA ZVUKA



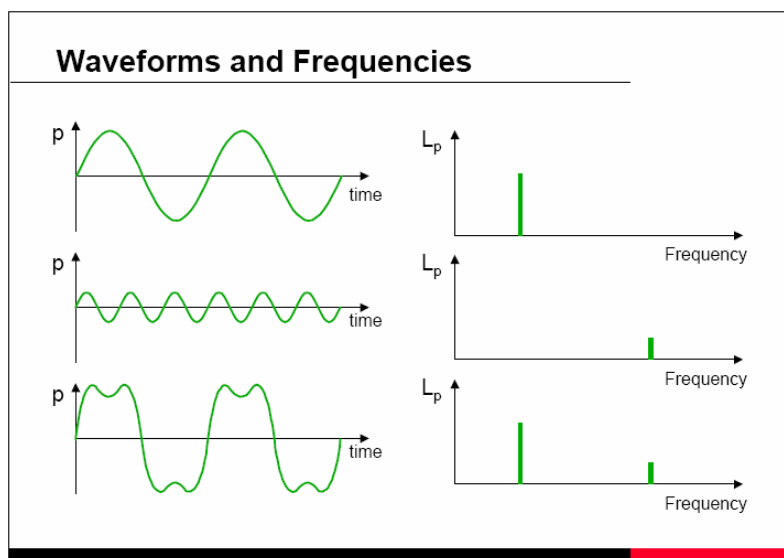
Difuzija se dešava kada zvuk prolazi kroz otvor, npr. otvor u zidu. Ako je otvor mali u poređenju sa talasnom dužinom zvuka, onda se zvuk koji prođe kroz otvor ponovo širiti u mnogim pravcima na sličan način kao zvuk iz originalnog izvora. Ako otvor ima veće dimanzije od talasne dužine zvuka, zvuk prolazi kroz otvor sa zanemarljivim poremećajem.

REFLEKSIJA ZVUKA



Ukoliko zvuk udara u prepreku koja je velika u poređenju sa talasnom dužinom zvuka, dešava se refleksija. Ukoliko prepreka ima malu apsorpciju, sav reflektovani zvuk imaće istu energiju kao i upadni zvuk. Ovo je jedan od važnih projektantskih principa koji se koriste u konstruisanju reverberacionih soba. Ukoliko se gotovo sva reflektovana energija gubi uskljed visoke apsorpcije reflektujuće površine, situacija je slična onoj koju imamo u anehoičnoj sobi.

FREKVENCIJA ZVUKA



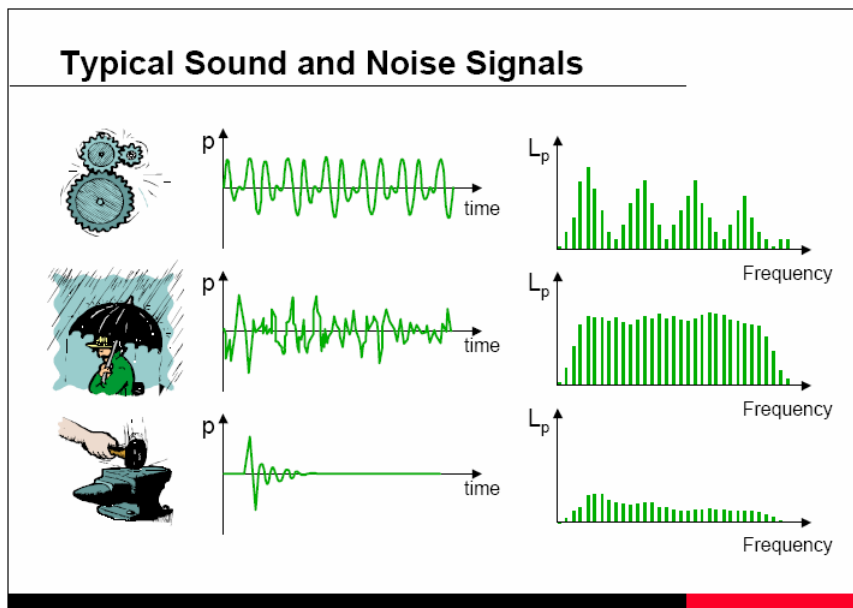
Na slici su prikazana tri primjera zvučnih signala čiji je talas dat u vremenskom domenu, a uporedno je prikazan odgovarajući frekvencijski spektar u frekvencijskom domenu.

Prvi primjer je sinusni talas visoke amplitude i velike talasne dužine koji je u frekvencijskom domenu prikazan jednom frekvencijskom komponentom male frekvencije i visokog nivoa amplitude.

Drugi primjer je signal niske amplitude i male talasne dužine koji je u frekvencijskom domenu prikazan jednom frekvencijskom komponentom veće frekvencije i niskog nivoa amplitude.

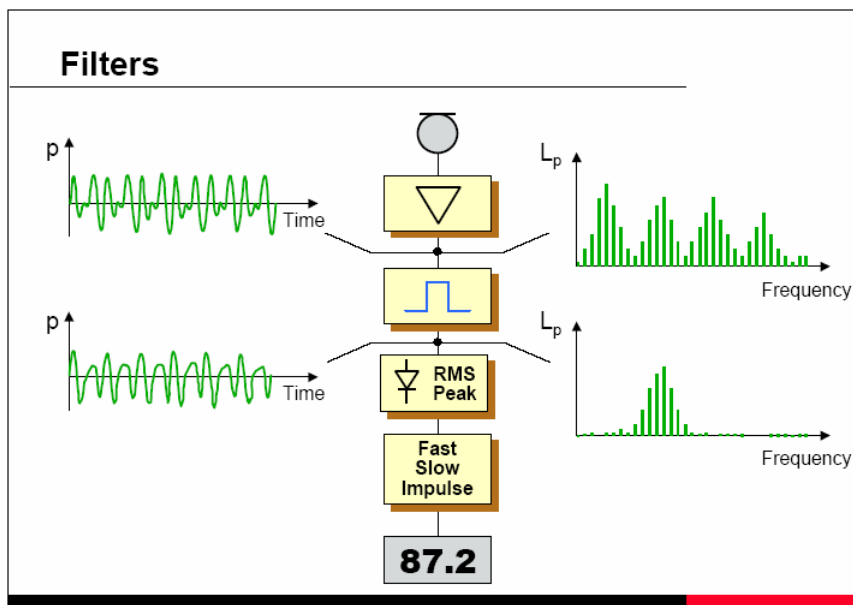
Posljednji primjer pokazuje zbir ova dva signala.

TIPIČNI SIGNALI ZVUKA (BUKE)



U većini slučajeva je signal zvuka koji potiče iz prirode kompleksnog oblika. Primaran rezultat frekvencijske analize zvučnog signala je da pokaže da je signal sastavljen od brojnih diskretnih frekvencija sa svojim individualnim nivoima i da su te komponente simultano prikazane u amplitudno-frekvencijskom domenu. Broj prikazanih diskretnih frekvencija zavisi od tačnosti frekvencijske analize, koju uvijek definiše korisnik. Na slici su prikazani primjeri determinističkog signala, slučajnog signala i impulsnog signala.

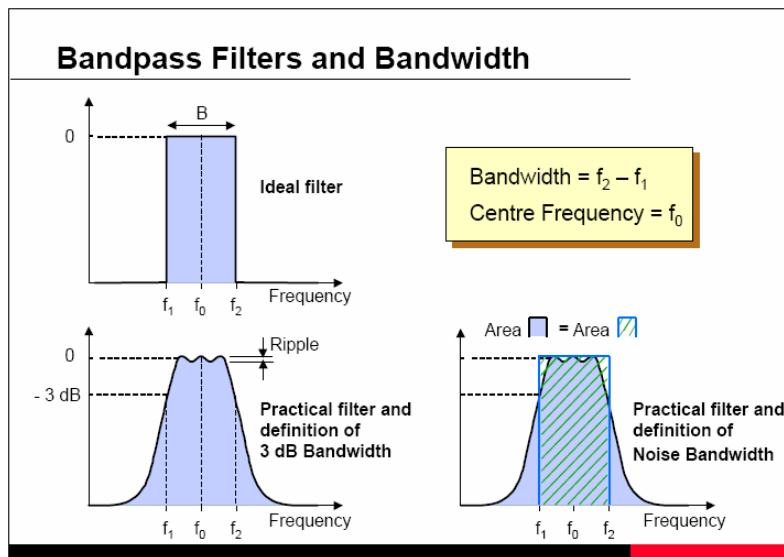
FILTERI



Da bi izvršili frekvencijsku analizu zvučnog signala neophodno je koristiti frekvencijske filtere. Ako je frekvencijski opseg tih filtera mali onda se postiže veća tačnost analize.

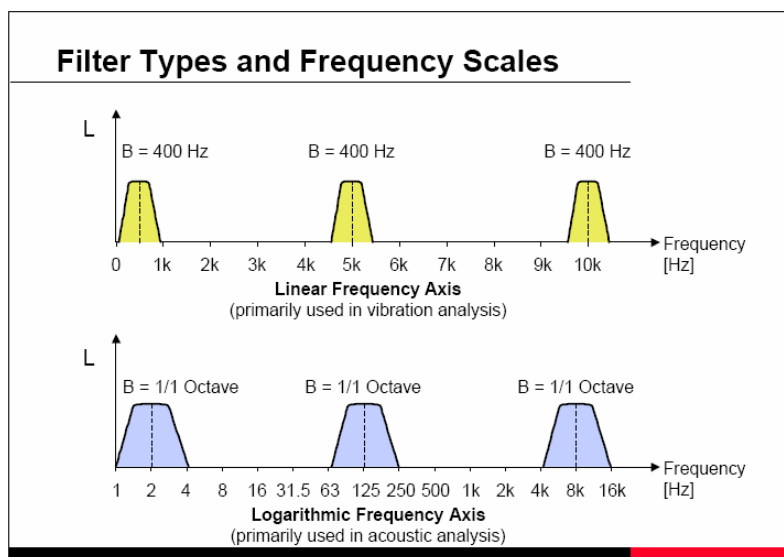
Na slici je pokazana karta toka signala koja ilustruje elemente u prostom instrumentu za mjerenje nivoa zvuka. Na početku lanca je mikروفon koji prima signal. Slijedi pojačavanje signala i prolazak kroz prost frekvencijski filter, ovdje prikazan kao idealan filter. Nakon prolaska kroz filter slijedi ispravljanje sa standardnim vremenskim konstantama *Fast*, *Slow* i *Impulse*, potom se nivo signala konačno pretvara u dB-vrijednost i prikazuje na displeju.

PROPUSNI OPSEG FILTERA



Idealni filteri oblika pravougaonika su samo matematička apstrakcija. U stvarnosti, filteri nemaju ravan vrh niti vertikalne bočne stranice. Odstupanje od idealizovanog ravnog oblika vrha opisuje se terminom “ripple“. Opseg filtera definisan je kao razlika frekvencija na mjestu gdje nivo pritiska ima pad od 3 dB, što odgovara 0.707 u apsolutnijoj mjeri. Efektivni opseg filtera (*noise bandwidth*) odgovara idealnom filteru istog nivoa kao što je realni filter, ali sa opsegom podešenim tako da filteri imaju iste “površine”, tj. da površine ispod krive realnog filtera i idealnog filtera budu iste.

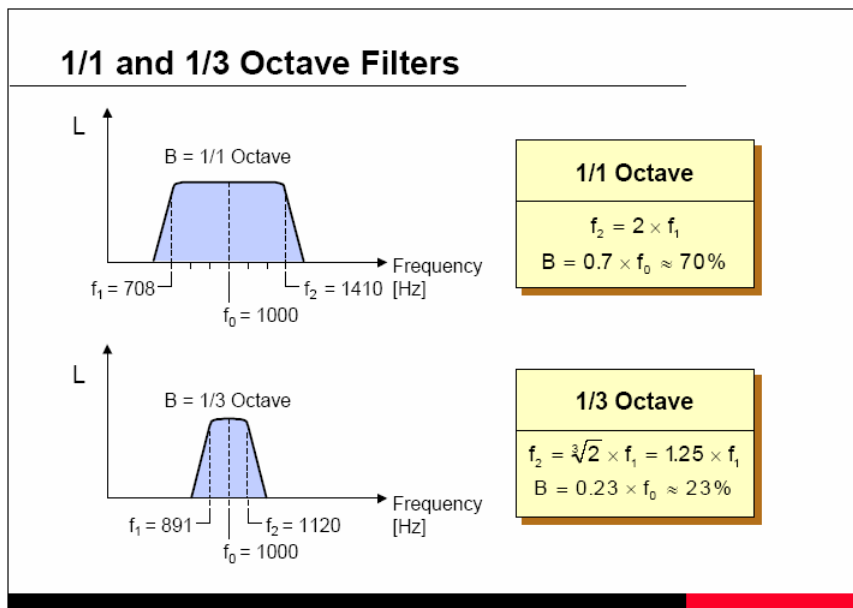
TIPOVI FILTERA I FREKVENCIJSKIH SKALA



Dvije najčešće korištene banke filtera su:

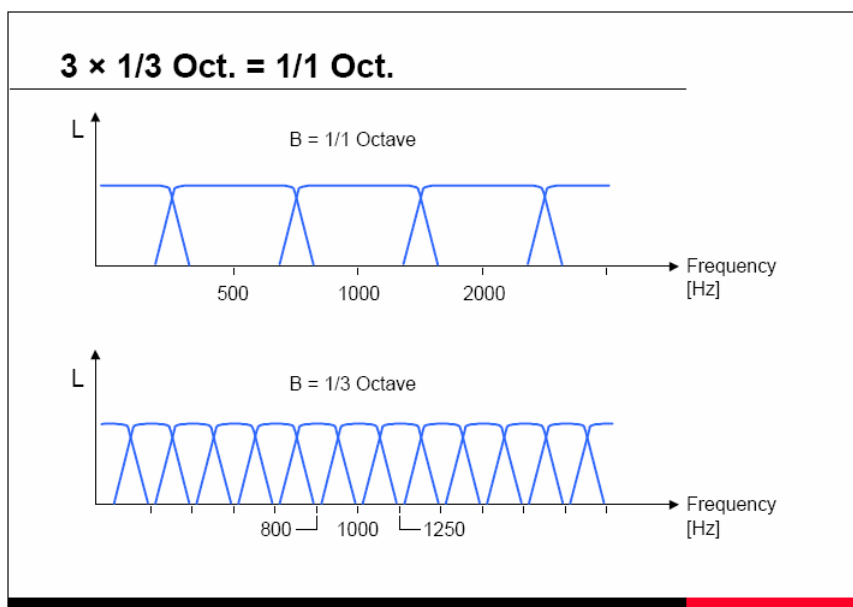
- Filteri koji imaju iste opsege, npr. 400 Hz, prikazuju se korištenjem linearne frekvencijske skale. Ovakav prikaz je obično rezultat tzv. FFT analize (*Fast Fourier Transformation* - brza Furijeova transformacija). Filteri konstantnog opsega uglavnom se koriste u analizi vibracijskih signala.
- Filteri koji imaju iste konstantne procenete opsega (CPB filteri - *Constan Percent Bandwidth*) npr. 1/1 oktava, uglavnom se prikazuju na logaritamskoj frekvencijskoj skali. Ponekad se ovakvi filteri nazivaju filteri relativnih opsega. Analiza sa CPB filterom (i logaritamskom skalom) se gotovo uvijek koristi u akustičkim mjerenjima, jer daje prilično blisku aproksimaciju onome što ljudsko uho čuje.

OKTAVNI I TERCNI FILTERI



Filter sa najširim opsegom je onaj sa opsegom od jedne oktave. Oktava predstavlja frekvencijski opseg čija je gornja granična frekvencija dva puta viša od donje granične frekvencije. Ipak, često se koriste i podjele u manje opsege. Filteri su obično označeni kao CPB filteri. Filter sa 1/1 oktavom ima opseg od blizu 70% od njegove centralne frekvencije f_0 . Najpopularniji filteri su oni sa opsegom od 1/3 oktave (tercni filteri), tj. ovi filteri imaju propusni opseg od oko 23% od centralne frekvencije f_0 . Jedna od prednosti ovih filtera je i ta da takav opseg za frekvencije iznad 500 Hz dobro odgovara selektivnosti frekvencija ljudskog slušnog sistema.

PREDNOSTI CPB FILTERA



Prednost CPB filtera je ta da npr. kombinovanjem dva susjedna filtera se dobija jedan filter ravnog vrha, ali dvostruke širine.

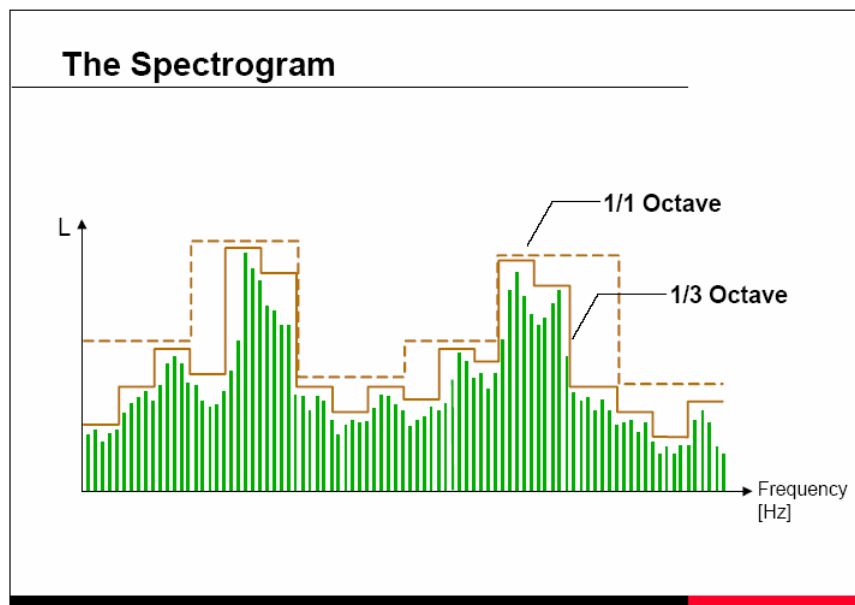
Tri 1/3 oktavna filtera kombinovana međusobno jednaka su jednom 1/1 oktavnom filteru.

OPSEZI TERCNIH I OKTAVNIH FILETRA

Band No.	Nominal Centre Frequency Hz	Third-octave Passband Hz	Octave Passband Hz
1	1,25	1,12 – 1,41	
2	1,6	1,41 – 1,78	
3	2	1,78 – 2,24	1,41 – 2,82
4	2,5	2,24 – 2,82	
5	3,15	2,82 – 3,55	
6	4	3,55 – 4,47	2,82 – 5,62
<hr/>			
27	500	447 – 562	355 – 708
28	630	562 – 708	
29	800	708 – 891	
30	1000	891 – 1120	780 – 1410
31	1250	1120 – 1410	
32	1600	1410 – 1780	
<hr/>			
40	10 K	8910 – 11200	
41	1,25 K	11,2 – 14,1	
42	16 K	14,1 – 17,8 K	11,2 – 22,4 K
43	20 K	17,8 – 22,4 K	

Postoje tabelarni prikazi koji uporedno daju redni broj opsega, nominalnu centralnu frekvenciju u Hz, opeg 1/3 oktave u Hz i opeg 1/1 oktave u Hz.

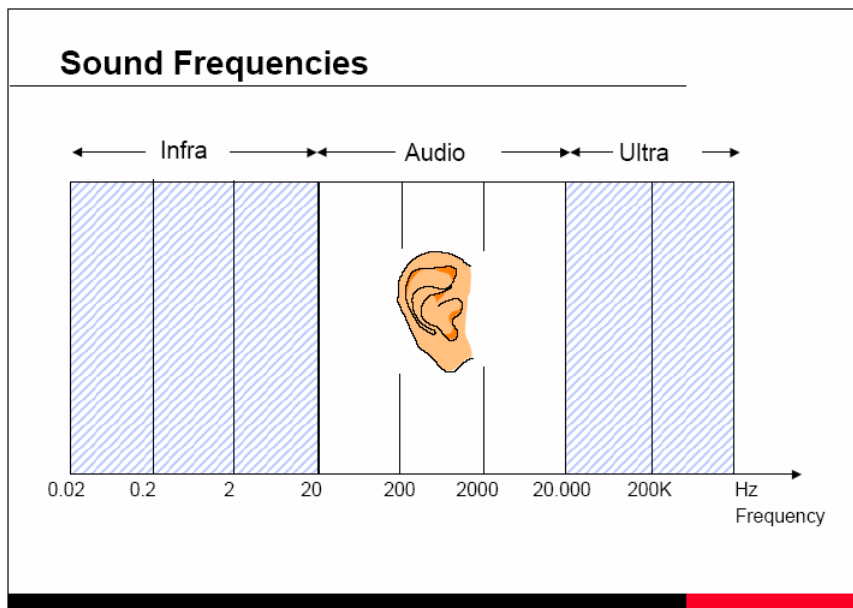
SPEKTAR (SPEKTROGRAM)



Na slici je prikazan jedan detaljan signal sa brojnim frekvencijskim komponentama različitih nivoa. Uporedo sa signalom prikazani su oblici signala za odgovarajuće filetere, i to:

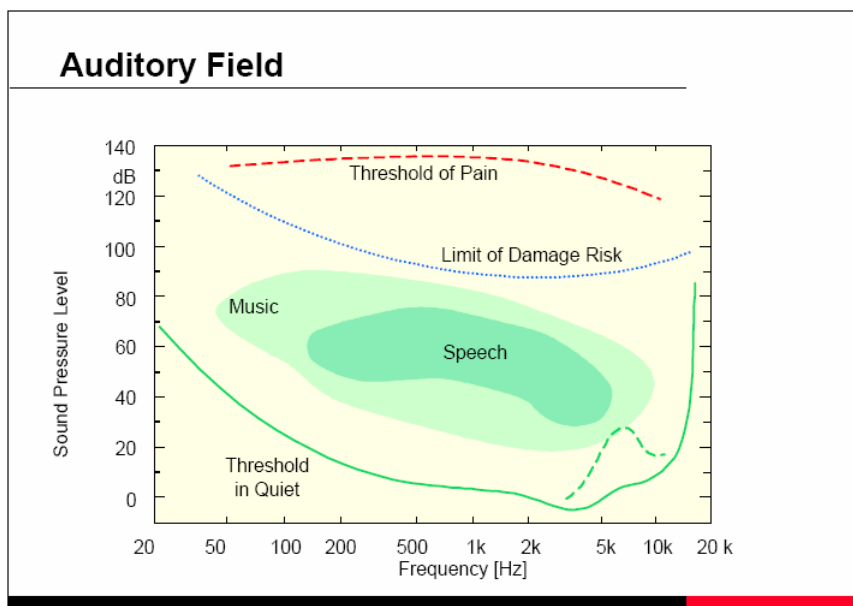
- crtkanom linijom prikazan je oblik signal koji bi dobili 1/1 oktavnom analizom
- puna linija pokazuje oblik signala kada se koristi 1/3 oktavna naliza (tercni filteri), uočljiva je povećana rezolucija koja daje više detalja nego 1/1 oktavna analiza.

FREKVENCIJE ZVUKA



Ljudski slušni aparat može da osjetiti samo zvukove u fekvencijskom opsegu od 20 Hz do 20 kHz.

ČUJNO POLJE

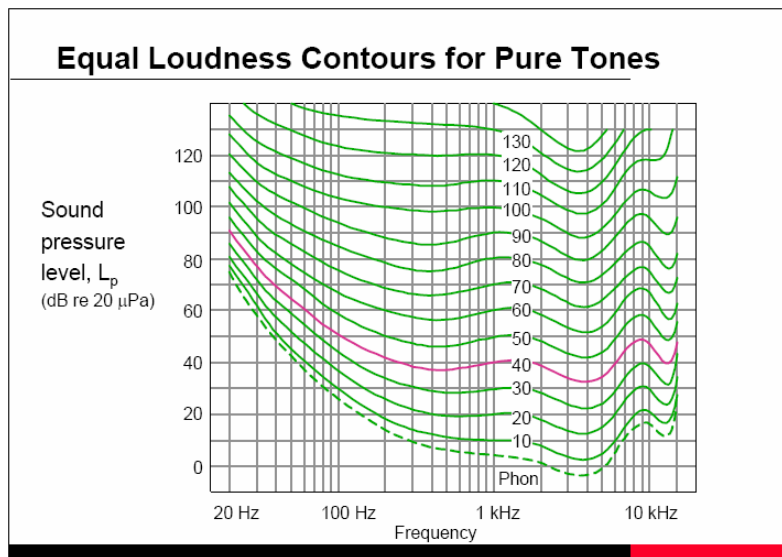


Amlitudno-frekvencijski prikaz čujnog polja pokazuje granice ljudskog slušnog sistema.

Puna linija, kao donja granica, označava prag čujnosti za čiste tonove. Prag čujnosti označava tonove različitih fekvencija i potrebnih amplituda da bi ih ljudski sluh uopšte mogao registrovati. Gornja, crtkana linija predstavlja granicu bola, odnosno amplitude tonova različitih fekvencija pri kojim se javlja bol. Tačkasta linija označava granicu rizika oštećenja sluha. Ako se granica rizika oštećenja postiže u dužem vremenskom periodu, može se desiti trajni gubitak sluha. Posljedica gubitka sluha je podizanju granice čujnosti kako je ilustrovano crtkanom linijom u donjem desnom uglu. Ovo znači da je potrebno proizvesti tonove više amplitude na određenim fekvencijama da bi ih ljudsko uha registrovalo.

Normalan govor i muzika imaju nivoe u osjenčenom području.

KRIVE JEDNAKE JAČINE ZVUKA ČISTOG TONA (IZOFONSKE LINIJE)



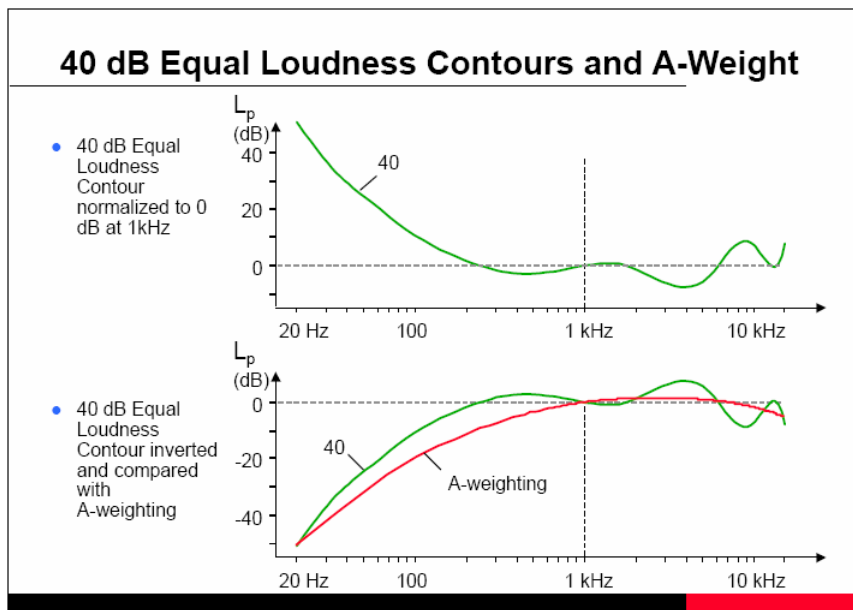
Postoji izvjesno neslaganje između objektivnih vrijednosti nivoa zvuka i subjektivnog doživljaja zvučnog nadražaja, jer dva tona istih zvučnih pritisaka a različitih frekvencija nemaju isti subjektivnu jačinu. Subjektivna jačina zvuka izražava se u fonima, [fon]. Na slici su prikazane linije jednake jačine za čiste tonove, tzv. izofonske linije. Crtkana linija pokazuje granicu čujnosti za percepciju zvuka sa oba uha. Upravo tok prikazanih linija ukazuje na vrlo izraženu nelinearnu karakteristiku ljudske percepcije zvuka. Na primjer, potrebno je gotovo 80 dB više nivoa zvučnog pritiska pri frekvenciji od 20 Hz da bi zvuk imao istu subjektivnu jačinu kao pri frekvencijama od 3 do 4 kHz. Druga bitna karakteristika ljudske percepcije zvuka je tzv. prikrivanje frkvencije, što predstavlja ograničenu sposobnosti sluha da razlikuje zvukove vrlo bliskih frekvencija pri niskim nivoima zvuka u prisustvu viših zvukova.

PERCEPCIJA ZVUKA

Perception of Noise	
Change in Sound Level (dB)	Change in Perceived Loudness
3	Just perceptible
5	Noticeable difference
10	Twice (or 1/2) as loud
15	Large change
20	Four times (or 1/4) as loud

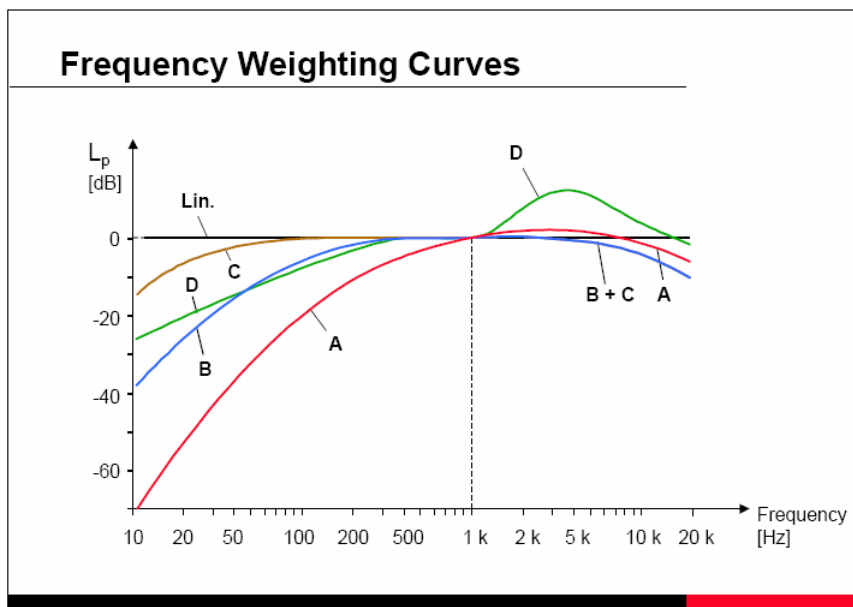
Tabela ilustruje kolika je potrebna promjena nivoa zvuka u dB da bi se proizvela određena promjena u glasnosti tog zvuka. Npr. promjena nivoa od 3 dB rezultiraće tek primjetnom promjenom glasnosti zvuka, a za osjetnu promjenu glasnosti potrebna je promjena nivoa od 5 dB. Pri promjeni nivoa za 10 dB zvuk osjećamo kao dvostruko glasniji, a pri promjeni od 20 dB zvuk osjećamo kao četiri puta glasniji. Ova promjena nivoa data je za zvuk frekvencije od 1 kHz. Za zvukove nižih i viših frekvencija od 1 kHz potrebna je mnogo veća promjena nivoa zvuka da bi proizvela odgovarajuću promjenu glasnosti tog zvuka.

A-TEŽINSKA KRIVA



Prvi primjer na slici pokazuje izofonsku liniju od 40 [fon]. Invertovanjem ove linije oko frekvencije od 1 kHz dobije se tzv. A-težinska kriva, koja pojedinim frekvencijama ili opsezima frekvencija daje veći ili manji značaj, odnosno “težinu”, usklađujući time dejstvo zvuka na čovjeka sa osjetljivošću organa sluha. Pri mjerenju nivoa zvuka, upotreba A-težinske krive se indikuje oznakom dB(A).

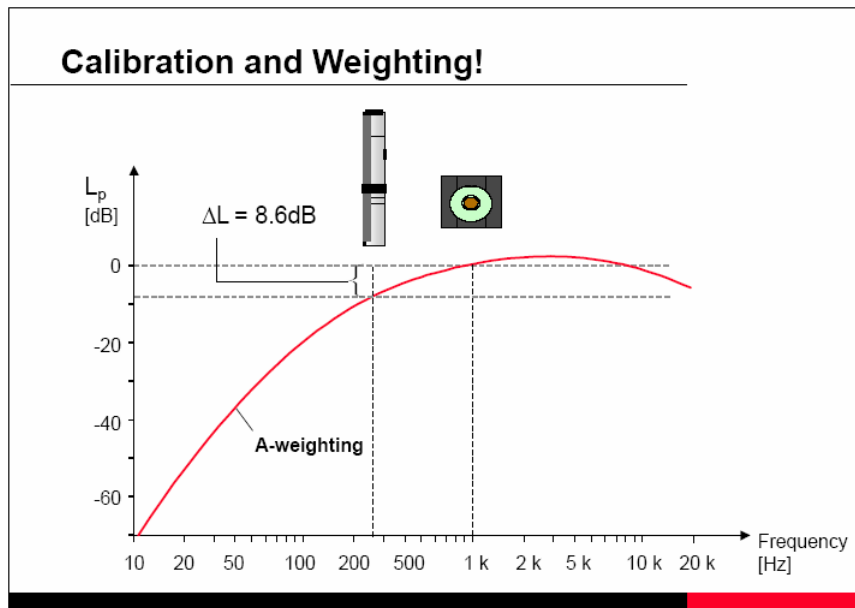
TEŽINSKE KRIVE: A, B, C, D



Osim A-težinske krive, koja odgovara izofonskoj liniji od 40 fon, postoje B i C težinske krive koje odgovaraju izofonskim linijama od 70 fon, odnosno 100 fon.

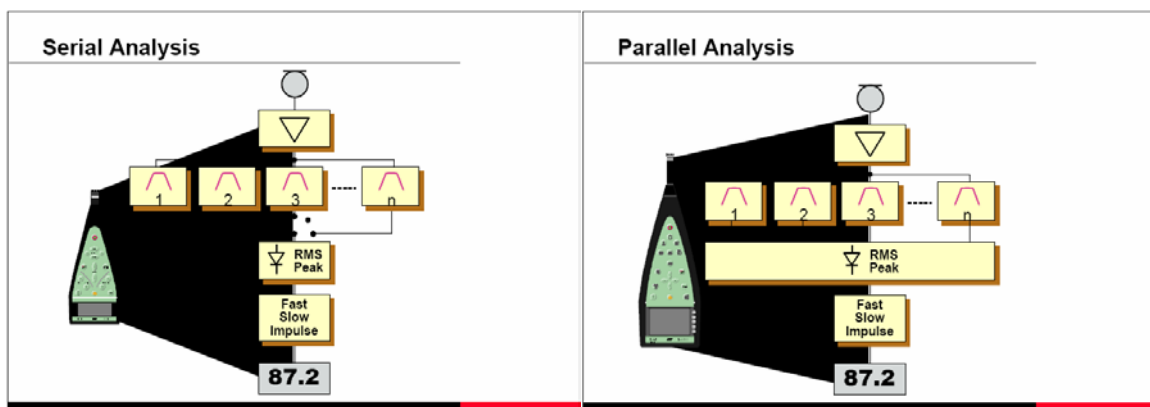
D-težinska kriva je specijalna kriva koja daje poseban naglasak na frekvencije u opsegu od 1 kHz do 10 kHz što se koristi za mjerenje avionske buke.

KALIBRACIJA I TEŽINSKE KRIVE



Potrebna je opreznost pri kalibraciji mjernog sistema kada je uključena težinska kriva. Upotrebom pistofona čija je frekvencija kalibracije 250 Hz dobije se nivo signala za 8.6 dB manji nego kada se koristi kalibrator nivoa zvuka čija je frekvencija 1000 Hz pri uključenoj A-težinskoj krivoj.

MJERAČ NIVOVA ZVUKA (*Sound level meter*)

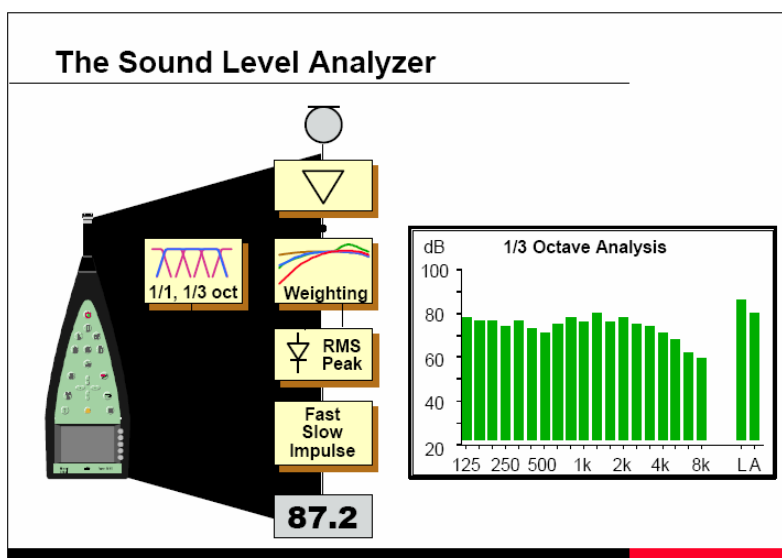


Detaljna frekvencijska analiza signala zvuka vrši se mjeračima nivoa zvuka koji imaju banku 1/1 ili 1/3 oktavnih filtera, koji mogu biti povezani serijski ili paralelno.

Mjerači zvuka koji imaju banku serijski vezanih filtera analizu signala vrše tako da je trenutno aktivan samo jedna filter, što zahtijeva duže vrijeme analize i polje zvuka treba biti stacionarno. Prednost ovih mjerača je njihova niska cijena.

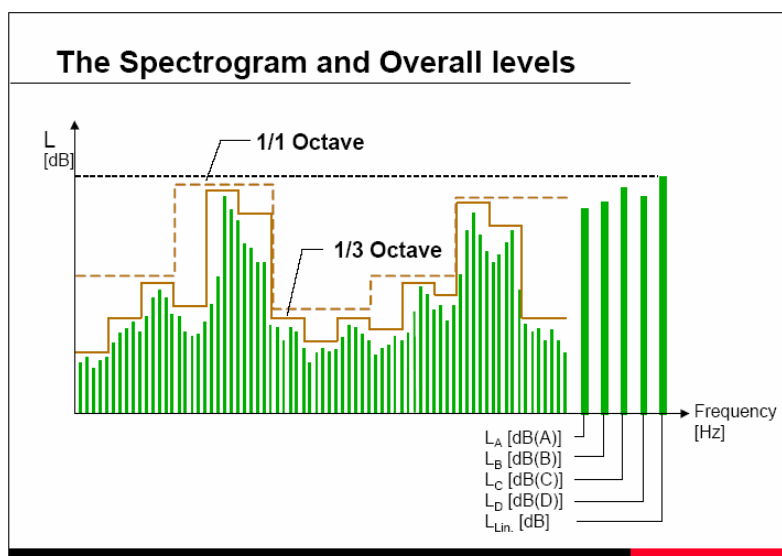
Mjerač nivoa zvuka sa bankom paralelno vezanih filtera jeste skuplji, ali je mnogo brži u radu i nije potrebno da signal zvuka bude stacionaran.

ANALIZATOR NIVOVA ZVUKA (*Sound level analyzer*)



Svi mjeraci zvuka imaju ugrađene A-težinske krive, a neki imaju ugrađene i B i C težinske krive. Današnji savremeni analizatori nivoa zvuka mogu funkcionisati kao obični mjeraci nivoa, a uz integrisane banke paralelnih filtera funkcionišu i kao frekvencijski analizatori signala.

VREDNOVANJE ZVUKA SPEKTOGRAMOM I UKUPNIM NIVOOM



Savremeni mjeraci zvuka opremljeni su kompleksnim displejom koji istovremeno pokazuje sve rezultate analize, kako frekvencijske analize tako i vrijednosti nivoa signala zvuka sa pridruženim različitim težinskim funkcijama.