

Vaja 5: Merjenje hrupa

Matej Bažec

14. november 2018

Povzetek

Spoznali bomo osnovne lastnosti hrupa, pogledali si bomo, kaj je to nivo hrupa, kako z njim računamo in tudi, kako ga izmerimo.

1 Uvod

S fizikalnega stališča se hrup ne razlikuje od običajnega zvoka. Kljub temu za hrup smatramo nezaželeno zvočno oddajanje. Tako kot vsak zvok tudi hrup nastane zaradi prenašanja mehanskih vibracij po zraku (ali v splošnem po katerem koli sredstvu). Te vibracije povzročajo lokalne zgostitve in razredčitve zraka (v bistvu so to nihanja gostote), ki definirajo razvoj dinamike zvoka. Zvok v zraku raje kot z nihanjem gostote opisujemo z nihanjem tlaka. Moramo pa se zavedati, da so ta nihanja zelo majhna v primerjavi z zračnim tlakom, ki je približno 10^5 Pa . Okrog te vrednosti niha zvok z amplitudo, ki je tipično bistveno nižja od 20 Pa , ki velja za mejo, ko lahko trajno poškodujemo sluh že pri kratkotrajni izpostavljenosti.

1.1 Nivo hrupa

Širjenje zvoka najraje opisujemo s tlakom kot funkcijo prostora in časa. V večini priemrov pa nas ne zanima valovna narava zvoka, ampak samo potovanje energetskega toka, saj ta ni odvisen od časa, če je izvor hrupa konstanten v času. Pokazati se da, da je energetski tok premosorazmeren s kvadratom amplitude nihanja tlaka. Raje kot z amplitudo nihanja navajamo nihanje tlaka z njegovo efektivno vrednostjo (RMS), ki je definirana kot koren povprečne vrednosti kvadrata tlaka po času.

Treba pa se je zavedati, da se človeško uho ne odziva linearno na energetski tok zvoka, ampak logaritemsko. Zato tudi definiramo nivo hrupa kot desetiški logaritem razmerja energetskega toka izmerjenega hrupa in energetskega toka hrupa na meji slišnosti. Slednja se sicer razlikuje od človeka do človeka, tako da se za to uporablja vrednost, ki ustreza povprečju populacije in je enaka $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ (RMS)[1]. Tako lahko definiramo nivo hrupa kot

$$L = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0}. \quad (1)$$

Enota je decibel (dB). Razlog, da uporabimo razmerje kvadratov je v tem, da je energetski tok sorazmeren s kvadratom efektivne vrednosti nihanja tlaka.

Nivo hrupa se z oddaljenostjo od izvora manjša. Zato za izvore hrupa večkrat navajamo moč oddajanja hrupa. Močnostni nivo podajamo tudi v logaritemski skali z referenco $P_w = 1 \text{ pW}$. Tak nivo je neodvisen od oddaljenosti in je enak

$$L_w = 10 \log \frac{P}{P_w}. \quad (2)$$

Enota je decibel (dB_w). Indeks w nam pove, da gre za močnostni nivo z referenco 1 pW . Če izvor oddaja hrup v vse smeri enakomerno, je na razdalji 1 m od izvora nivo hrupa za približno 11 dB manjši od energetskega nivoja.

Nivo hrupa je definiran v logaritemski skali. Pove nam desetiški faktor, za kolikokrat smo presegli mejo slišnosti.

1.2 Filtri

Ni vsak enako močen hrup enako moteč za človeka. Zvok s frekvenco pod 20Hz in nad 20kHz sploh ne slišimo. Tudi v slišnem delu se na zvok z različnimi frekvencami naše uho ne odziva enako. Najbolj je občutljivo na frekvence okrog 1kHz. Kako lahko to prilagodimo v neko količino, ki bo odsevala to dejstvo?

Vsako časovno spreminjajočo količino lahko z nekim matematičnim postopkom (Fourierova transformacija) razstavimo po frekvenčnih komponentah. Vsako od teh frekvenčnih komponent ustrezno obtežimo - v našem primeru z odzivnostjo človeškega ušesa. Takemu matematičnemu postopku v splošnem pravimo frekvenčno filtriranje. V konkretnem primeru pa takemu filtru pravimo zvočni filter A. Izračunamo efektivno vrednost tlaka in zanjo izračunamo nivo hrupa. Takemu nivoju pravimo nivo A in ga označimo z L_A .

Nivo A je prilagojen odzivnosti človeškega ušesa na zvok z različnimi frekvencami.

Hrup ni nezaželen pojav ne samo zaradi motečnosti, ampak tudi zaradi morebitnih poškodb slišnih organov, ki jih lahko povzroči. V prvem približku nam zvok z neko frekvenco povzroči toliko poškodb na ušesu, kolikor je občutljivo na tisto frekvenco. Če pa smo natančnejši, nam nižje frekvence povzročijo nekoliko več poškodb, kot visoke. Če torej želimo navesti nivo, ki bo ekvivalenten povzročenim poškodbam ušesa, uporabimo ustrezno popravljen A filter, ki mu pravimo C filter. Takemu nivoju pravimo nivo C in ga označimo z L_C .

Nivo C pove, koliko bo dan hrup povzročil poškodb na našem ušesu.

2 Padanje hrupa z oddaljenostjo, absorbcija in odboj zvoka

2.1 Točkasti in linijski izvori

Če želimo izračunati širjenje hrupa v prostoru, moramo izračunati valovno enačbo v dani geometriji. To je v splošnem postopek, ki se ga lotevamo z računalnikom. V nekaterih posebnih primerih pa lahko uporabimo modele, ki nam zadosti dobro opisujejo propagacijo zvoka. Ogledali si bomo dva taka modela: točkasti in linijski izvor.

Pri prvem predpostavimo, da celoten hrup izvira iz točke v vse smeri enomerno. Ta model lahko uporabimo npr. za letalo na zadosti veliki razdalji. Potem bo zvok potoval v vse smeri v koncentričnih kroglih. Če odmislimo absorbcijo, bo celotna moč na vsaki krogli s centrom v izvoru hrupa enaka. To pa pomeni, da bo energetski tok padal s kvadratom razdalje

$$j = \frac{P}{4\pi R^2}. \quad (3)$$

Posledično bo nivo padal kot

$$L_2 = 10 \log \frac{j_2}{j_0} = 10 \log \frac{P}{j_0 4\pi R_2^2} = 10 \log \frac{j_1 4\pi R_1^2}{j_0 4\pi R_2^2} = 10 \log \frac{j_1}{j_0} + 20 \log \frac{R_1}{R_2} = L_1 + 20 \log \frac{R_1}{R_2}, \quad (4)$$

če sta L_1 in L_2 nivoja na razdalji R_1 in R_2 .

Podobno lahko izpeljemo za linijski izvor, le da bo zvok potoval v tem primeru po cilindrih z isto osjo v izvoru

$$j = \frac{P}{2\pi R h}. \quad (5)$$

V tem primeru bo nivo padal kot

$$L_2 = L_1 + 10 \log \frac{R_1}{R_2}. \quad (6)$$

Dober primer takega izvora hrupa je raven cestni odsek.

2.2 Absorbcija zvoka

Točkasti in linijski model sta tem natančnejša, čim večja je oddaljenost od izvora. Žal pa pri večjih razdaljah prevladuje absorbcija zvoka. Ta nastane, ker se del mehanske energije pretvori v toplotno (bolje rečeno notranjo) energijo. Absorbcija je precej odvisna od vremenskih parametrov, kot so temperatura, tlak in vlaga. Poleg tega je absorbcija pri višjih frekvencah praviloma večja kot pri nižjih.

Ker zaradi absorbcije hrup pada eksponentno, bo nivo padal linearno. Tipično so te vrednosti nekaj decibelov na 10m.

2.3 Odboj zvoka in ostali valovni pojavi

Kako se bo hrup širil po prostoru je seveda odvisno tudi od ostalih dejavnikov, kot so pregrade. Na njih se zvok lahko odbija, ali uklanja. Pri prvem gre za pojav, ki je ekvivalenten odboju (pogovorno rečemo odsevu) svetlobe v ogledalu. Poudariti je treba, da se zvok dosti raje odbija od sten kot svetloba. To pa je zato, ker so tipične valovne dolžine zvoka reda velikosti metra. To pomeni, da je stena za zvok popolnoma ravna (za svetlobo seveda ni, zato pride do disipacije).

Uklon pomeni, da valovanje potuje mimo pregrade tudi v smereh izven direktnega vpada. Zato slišimo človekov govor tudi, če da roko pred sabo. Zaradi kombinacije uklona in odboja lahko pride tudi do interferenčnih pojavov. Zaradi tega lahko nek izvor v dani točki slišimo bolje kot v drugi (do interference lahko pride tudi, če imamo koherentna izvora).

3 Seštevanje izvorov hrupa

Ne glede na to, kateri nivo hrupa merimo, moramo pri seštevanju prispevkov več izvorov hrupa upoštevati logaritemsko naravo nivoja hrupa. Dinamiko razvoja hrupa nam definira valovna enačba za tlak. Torej zanj velja načelo superpozicije, kar pomeni, da je trenutni tlak na danem mestu in času pri dveh izvorih enak vsoti tlakov na istem mestu ob istem času, če bi eden od izvorov manjkal. Če je torej $p_1(\mathbf{r}, t)$ tlak, ki ga povzroča prvi izvor, in $p_2(\mathbf{r}, t)$ tlak, ki ga povzroča drugi izvor, bo celoten tlak enak vsoti obeh. Poudariti pa je treba, da v izrazu za nivo hrupa nastopa efektivna vrednost tlaka (ali njen kvadrat).

Kvadrat efektivne vrednosti tlaka izračunamo kot časovno povprečje trenutnega tlaka

$$\overline{p^2} = \overline{p_1(\mathbf{r}, t) + p_2(\mathbf{r}, t)} = \overline{p_1^2} + \overline{p_2^2} + 2\overline{p_1(\mathbf{r}, t)p_2(\mathbf{r}, t)}, \quad (7)$$

pri čemer s p_1 in p_2 (brez funkcijske odvisnosti) mislimo na efektivni vrednosti obeh tlakov. Mešani člen je v splošnem odvisen od koreliranosti obeh izvorov zvoka. Zaradi korelacije lahko pride do interference obeh izvorov. Na srečo so izvori hrupa bed seboj nekorelirani. To pomeni, da sta oba tlaka med seboj nepovezana

$$\overline{p_1(\mathbf{r}, t)p_2(\mathbf{r}, t)} = \overline{p_1(\mathbf{r}, t)}\overline{p_2(\mathbf{r}, t)}. \quad (8)$$

Povprečje posameznega tlaka pa je enako 0. S tem lahko privzamemo, da se kvadrati efektivnih tlakov seštevajo

$$p^2 = p_1^2 + p_2^2 \quad (9)$$

s tem pa tudi gostoti energetskega toka

$$j = j_1 + j_2. \quad (10)$$

Tako lahko izračunamo nivo skupnega hrupa, če poznamo nivo hrupa posameznega izvora. Najprej izrazimo gostoto energetskega toka z nivojema

$$j_1 = j_{\text{ref}} 10^{\frac{L_1}{10}} \quad (11)$$

in

$$j_2 = j_{\text{ref}} 10^{\frac{L_2}{10}}. \quad (12)$$

Nato ju seštejemo in vstavimo v 1.

$$L = 10 \log \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} \right) \quad (13)$$

Na podoben način lahko izpeljemo enačbo za nivo hrupa L za N enako močnih izvorov hrupa, če poznamo nivo posameznega izvora L_1 .

$$L = L_1 + 10 \log N \quad (14)$$

Izpelji zgornjo relacijo (14).

Reši nalogo na spletni strani <http://vaje.fpp.uni-lj.si/tm>.

4 Meritev hrupa dveh elektromotorjev.

Primer meritve hrupa bomo izvedli na meritvi dveh elektromotorjev. Najprej bomo izmerili hrup ozadja, nato hrup samo prvega, samo drugega in na koncu obeh elektromotorjev skupaj. Vsako meritev bomo izvajali po 5 minut.

Iz meritve hrupa ozadja in prvega motorja določi prispevek slednjega. Izračun ponovi za drugi motor. Iz teh vrednosti izračunaj pričakovano vrednost obeh motorjev skupaj. Izračune in postopek, ki si jih pri tem uporabljal, napiši spodaj.

$L_0 =$ _____ dB_A (Ozadje)
 $L_{1M} =$ _____ dB_A (Meritev prvega)
 $L_{1P} =$ _____ dB_A (Prispevek prvega)
 $L_{2M} =$ _____ dB_A (Meritev drugega)
 $L_{2P} =$ _____ dB_A (Prispevek drugega)
 $L_{SM} =$ _____ dB_A (Meritev skupaj)
 $L_{SI} =$ _____ dB_A (Izračun skupaj)

Literatura

- [1] Ansi s1.1-1994. Technical report, 1994.
- [2] M. Valič. *Fizikalne meritve*.