

# **PRESEK**

**List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje**

ISSN 0351-6652

Letnik 33 (2005/2006)

Številka 5

Strani 10-12

Janez Strnad:

## **SLUH**

Ključne besede: fizika, valovanje, zvok, glasnost, jakost, gostota, fon, decibel.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/33/1631-Strnad.pdf>

© 2006 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

# Sluh

Od petih čutov sta dva povezana z valovanjem, z njima spoznavamo okolico in prenašamo sporočila na srednjih in velikih razdaljah. Zvok in svetloba pa se močno razlikujeta. Zvok potuje samo po snovi z veliko manjšo hitrostjo od svetlobe in ima veliko manjšo frekvenco. Na drugi strani pa imamo ljudje poleg sprejemnika tudi izvir zvoka, a nimamo izvira svetlobe. Zapisa o merjenju zvoka in hrupu v drugi številki Preseka lahko izkoristimo za nekaj dodatnih ugotovitev o *sluhu*.

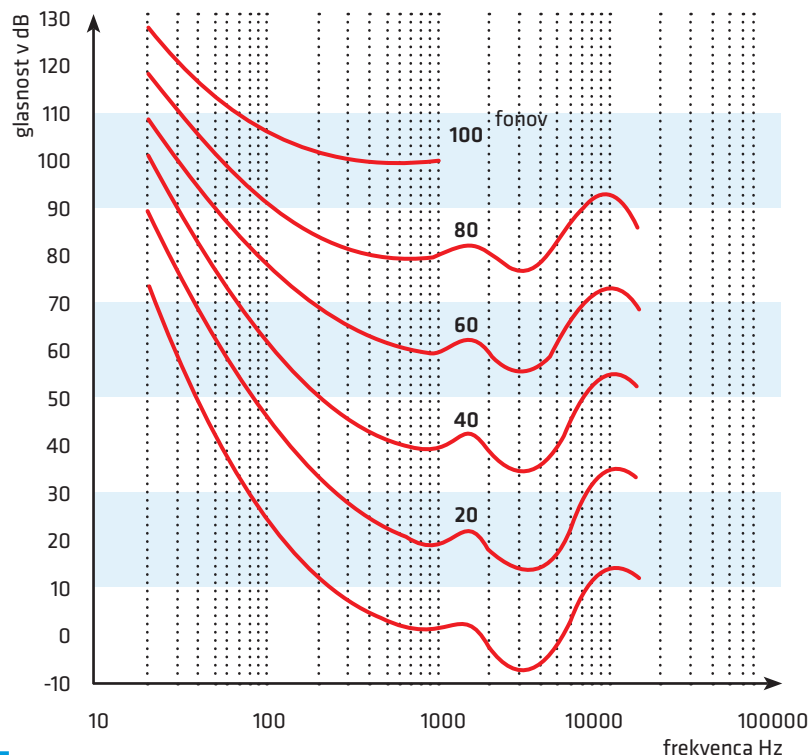
Janez  
Strnad

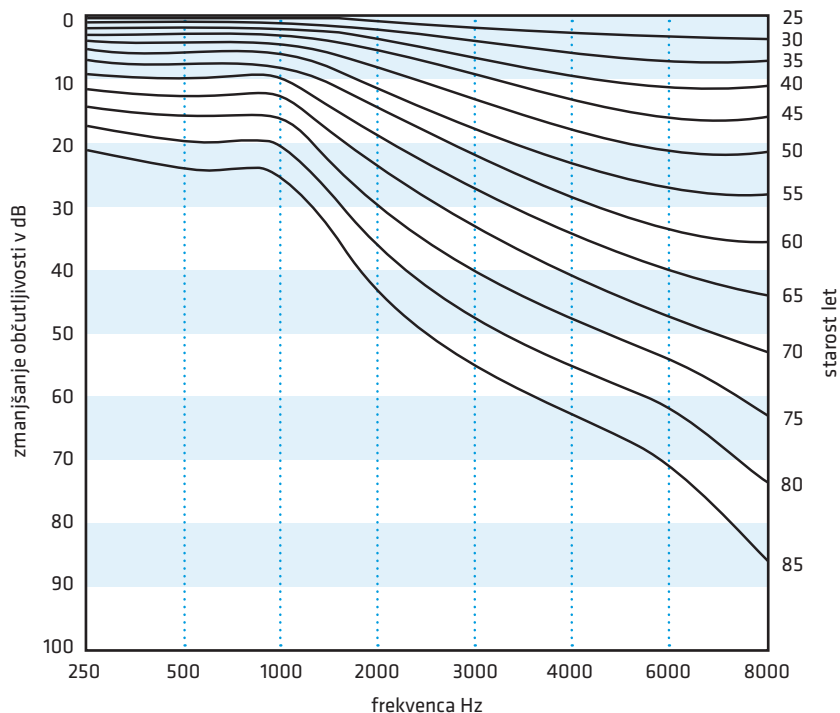
Poleg podatka o tem, katere *frekvence* so zastopane v zvoku, je pomembna *jakost zvoka*. Frekvenca meri število nihajev v sekundi, jakost pa gostoto energijskega toka, to je energijo, ki jo zvok v sekundi prenese skozi okvir s ploščino kvadratnega metra, pravokotnega na smer potovanja zvoka. Jakost je odvisna od gostote snovi, po kateri potuje zvok, od frekvence in od amplitude odmika, to je največjega odmika delov snovi od ravnovesne lege. Namesto amplitude odmika lahko podamo amplitudo tlaka, to je največji odmik tlaka v zvoku od ravnovesnega tlaka. S tem smo opredelili zvok po fizikalni strani. Pomemben pa je tudi občutek, ki ga izzove zvok, kar opredeljuje zvok po fiziološki strani. Zveza med občutkom in jakostjo je zapletena. Predvsem je odvisna od frekvence, saj zvoka z manjšo frekvenco od 16 Hz in z večjo od 20 000 Hz sploh ne slišimo. 1 hertz, Hz ali  $1 \text{ s}^{-1}$  je enota za merjenje frekvence.

Iskanje zveze si olajšamo, če se omejimo na zvok z določeno frekvenco, ki mu v fiziki pravimo *ton*. V prvem koraku vpeljemo *glasnost* prek razmerja med dano jakostjo zvoka in najmanjšo jakostjo, ki jo uho še zazna. Pri tem se odločimo, da upoštevamo neodvisno od frekvence *slišni prag*  $j_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Zvoku z jakostjo  $j_0$  priredimo glasnost 0 dB (decibelov), z jakostjo  $10j_0$  glasnost 10 dB, z jakostjo  $100j_0$  glasnost 20 dB, z jakostjo  $1000j_0$  glasnost 30 dB, ... z jakostjo  $10^{12}j_0 = 1 \text{ W/m}^2$  glasnost 120 dB. S tem smo upoštevali, da uho zazna zvok na zelo širokem območju jakosti: »glasnosti seštevamo, ko jakosti množimo«. Nismo pa še upoštevali, da je občutek odvisen od frekvence.

**Slika 1.** Obrisi enake glasnosti iz ISO Standarda 226: 2003. Na navpično os nanesemo glasnost v decibelih, na vodoravno os pa frekvenco. Črtkane dele so dobili z oceno. Glasnost v fonih je navedena kot parameter. Diagram je dvojno logaritmičen, na obeh oseh enaki odseki ustrezajo enakim razmerjem, ne enakim razlikam, kakor navadno. Tudi v angleščini še ni enotnega poimenovanja. ISO priporoča za merilnik sound level meter SLM, za glasnost v dB sound pressure level SPL, za glasnost v fonih, kot kaže, ni posebnega imena. V slovenščini še ni ustaljenih izrazov. Za zdaj je smiselno govoriti o glasnosti in iz ot razbrati, ali gre za lestvico z decibeli ali za lestvico s foni. Lestvico s soni uporabljajo le poredko.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Fletcher-Munson\\\_curves](http://en.wikipedia.org/wiki/Fletcher-Munson\_curves)





**Slika 2.** Občutljivost ušesa se s starostjo zmanjša. Na navpično os naneseemo zmanjšanje glasnosti v decibelih, na vodoravno pa frekvenco. Starost je navedena kot parameter na desni strani. Spomnimo se, kako smo vpeljali glasnost. Iz podatka v decibelih dobimo ustrezno razmerje jakosti: 0 dB ustreza razmerje 1, 1 dB razmerje 10, 2 dB razmerje 100, ..., 120 dB razmerje  $10^{12}$ . Diagram je delo J. de Laata iz medicinskega centra univerze v Leidnu in je posnet po članku L. F. J. Hermansa *Stara ušesa* v Europhysics News januarja 2005.

glasnosti in majhni frekvenci. Ton s frekvenco 100 Hz se npr. pri glasnosti 30 dB zdi enako glasen kot ton s frekvenco 1000 Hz pri glasnosti 10 dB. Ton s frekvenco 20 Hz se pri glasnosti 75 dB zdi enako glasen kot ton s frekvenco 1000 Hz pri glasnosti 10 dB. Zaradi tega pri poslušanju glasbe z majhno glasnostjo basi ne pridejo do izraza. Radijski sprejemniki imajo poseben gumb, s katerim lahko v takem primeru base dodatno ojačimo.

Občutka ni mogoče naravnost izmeriti z merilnikom, vsak človek dojamе zvok nekoliko po svoje. Zato je treba vključiti v poskus veliko ljudi in se nazadnje dogovoriti za povprečje. Leta 1933 so v Bellovih laboratorijih v ZDA izvedli obsežne poskuse te vrste. Pri tem so udeleženci poskusa primerjali glasnost tona s frekvenco, ki so jo po potrebi naravnali, z glasnostjo tona s frekvenco 1000 Hz pri različnih glasnostih. Ni lahko ugotoviti, kdaj se zdita tona z različnima frekvencama enako glasna. Povprečja, ki so jih dobili, so ponazorili s *krivuljami enake glasnosti*. Vrsto poskusov so ponovili leta 1956 v Angliji in dobili nekoliko drugačne krivulje. Leta 2003 je Mednarodna organizacija za standardizacijo ISO merjenja obnovila in izdala ISO Standard 226: 2003 (slika 1) z *obrisi enake glasnosti* (Equal Loudness Contours). Novo ime poudari, da gre za primerjavo občutkov, ki vključuje povprečje in v podrobnosti ni nujno uporabna za posamičnega opazovalca.

Dobljene podatke za glasnost izrazimo z novo enoto *fon* in jih tako razločimo od podatkov na podlagi enotnega slišnega praga v decibelih. Ker izhajajo od frekvence 1000 Hz, se pri tej frekvenci podatki za glasnost v fonih ujemajo s podatki v decibelih. Obris pri 0 fonih kaže, da je uho najobčutljivejše pri frekvenci na pasu med 2000 in 4500 Hz. To povezujejo z resonanco zvočne poti v ušesu. Pri frekvenci 1000 Hz komaj zaznamo ton z glasnostjo 4 fone, kar pomeni, da je pri tej frekvenci slišni prag  $2,5 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$  večji kot  $j_0$ . Na pasu od 500 do 1000 Hz je odvisnost od frekvence šibka in so obrisi približno vodoravni. Pri manjših frekvencah kot 500 Hz in večjih kot 5000 Hz pa je uho precej manj občutljivo. Slednje se pokaže predvsem pri majhni

Glasnost v fonih podaja slišni občutek, kolikor je to mogoče. Vendar mersko število ni sorazmerno z občutkom. V ta namen so leta 1936 vpeljali še drugo lestvico z enoto son. Ugotovili so, da glasnost orkestrrov leži med 40 in 100 fonov in da mora v koncertni dvorani narasti glasnost za 10 fonov, da se zvok zdi dvakrat glasnejši. Zato so glasnosti 40 fonov priredili 1 son, glasnosti 50 fonov 2 sone, glasnosti 60 fonov 4 sone, ... in glasnosti 100 fonov 64 sonov. Tako npr. glasbeni oznaki ff (fortissimo, zelo glasno) približno priredijo 64 sonov, oznaki f (forte, glasno) 16 sonov, oznaki p (piano, tiho) 4 sone, oznaki pp (pianissimo, zelo tiho) 1 son.

Tudi pri zaznavanju svetlobe je vidni občutek v očesu odvisen od frekvence. Tudi pri očesu je gostota najmanjšega energijskega toka, ki ga še zaznamo pri valovni dolžini 555 nm, pri kateri je oko najbolj občutljivo, enaka  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Toda uho je v nekem pogledu zmogljivejše od očesa: v večji meri razloči sestavine z različnimi frekvencami. Oko zazna belo, če so v svetlobi zastopane vse spektralne barve ali samo rdeča in zelena ali samo modra in rumena ... Uho pa loči zvena, to je mešanici tonov, če se ne ujemata po deležu sestavin z različnimi frekvencami. Pri svetlobi povezava med *fizikalnim merilom* in *fiziološkim merilom* ni odvisna od jakosti in jo podamo z eno samo krivuljo, *relativno občutljivostjo očesa*. Pri zvoku pa moramo navesti obrise enake glasnosti za več glasnosti. To je najbrž tudi razlog, da so fiziološko merilo pri svetlobi vpeljali drugače kot pri zvoku. Fiziološko enoto za svetilnost, kandelu, so celo uvrstili med osnovne enote mednarodnega sistema enot.

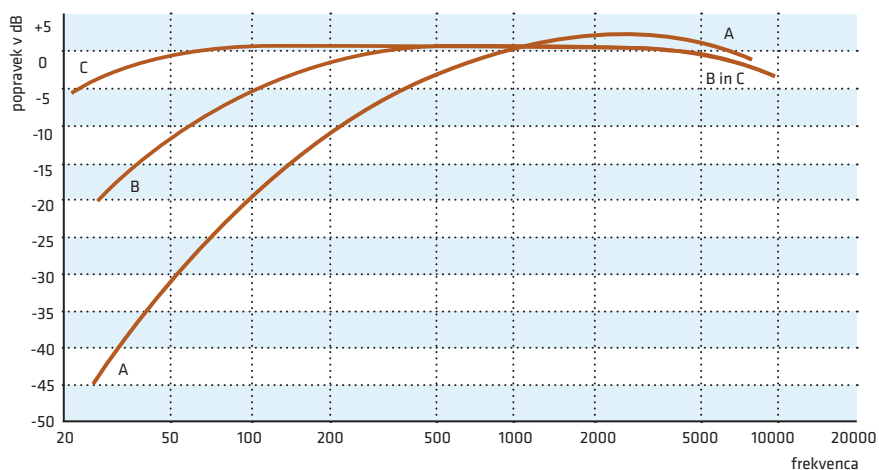
Pri zvenih je smiselno za vsak ton uporabiti navedene ugotovitve in prispevke sešteti po vseh zastopanih frekvencah. Podobno ravnamo pri šumih, ki imajo zvezni spekter. Veliko je še dodatnih zapletov. Udeleženci poskusov, pri katerih primerjajo glasnost za različne frekvence, pred poskusom nekaj časa ne smejo biti izpostavljeni hrupu. Zvoki, ki jih primerjajo, morajo trajati vsaj sekundo ali nekaj sekund. Zvok, ki traja manj časa, npr. 0,1 sekunde, se zdi manj glasen. Enako velja za zvok, ki traja precej več, na primer pet minut. Izidi se spreminjajo tudi iz dežele v deželo, za Japonce so npr. nekoliko drugačni kot za Evropejce. Obrise so dobili z udeleženci starimi od 18 do 25 let. Občutljivost z leti namreč precej izrazito pojema.

To pojemanje z leti postaja vse izrazitejše in se pozna posebno pri večji frekvenci (slika 2). Pri frekvenci 2000 Hz pri 50 letih izgubimo 15 dB, kot da bi se jakost približno tridesetkrat zmanjšala, pri 75 letih 30 dB, kot da bi se jakost tisočkrat zmanjšala. Pri frekvenci 8000 Hz pri 50 letih izgubimo 20 dB, kot da bi se jakost stokrat zmanjšala, pri 75 letih pa celo 60 dB, kot da bi se jakost milijonkrat zmanjšala. Podatek, da slišimo zvok do frekvence 20 000 Hz, je potemtakem treba sprejeti s pridržkom. Velja približno za mlade ljudi. Z leti se meja, ki je dokaj zabrisana, premika k vse nižjim frekvencam in se po sedemdesetem letu premakne tudi pod 8000 Hz. To pri poslušanju radia ne moti veliko, ker lahko povečamo jakost. Bolj moti pri pogovoru dveh v množici ljudi. Soglasnike p, t, k, f, s prepoznamo predvsem po njihovih sestavinah z veliko frekvenco. Zato jih v starosti slabše slišimo, posebno ko se pogovarjamo v množici, in slabše razločimo.

Pri pogovoru s sogovornikom se osredotočimo na zvok, ki prihaja iz določene smeri. To lahko določimo v smeri naprej celo na 1 do 2 stopinji natančno. Pri tem izkoristimo dva pojava. Prvi je zakasnitev, s katero odmik delov zraka doseže levo in desno uho. Pri tem mora biti valovna dolžina večja od razdalje med ušesoma. V ta namen so uporabne frekvence, manjše od 1500 Hz. Toda v dvoranah pogosto prevladuje hrup z majhno frekvenco, ker se zvok pri odboju tem manj oslabi, čim manjša je frekvenca. Zato opisani pojav ni posebno uporaben. Uporabnejša je zakasnitev, s katero jakost zvoka doseže levo in desno uho. Pri tem ne moti uklon le, če je valovna dolžina manjša kot razdalja med ušesoma. Uporaben je tedaj le zvok s frekvenco nad 3000 Hz. Ker ta zvok stari ljudje slabše zaznavajo, ne morejo

izkoristiti tudi drugega pojava. Pomagajo si lahko tako kot navajeni naglušni ljudje, ki opazujejo ustnice govorečega.

Ali se vam ni zdelo zgodba o decibelih, fonih in sonih precej zapletena? Pri tem niste osamljeni. Podobnega mnenja so tudi strokovnjaki, ki zato opuščajo glasnost v fonih. Pri tem jim pomaga dejstvo, da sodobni merilniki zvok mimogrede razstavijo na sestavine z različnimi frekvencami. Tako je mogoče z elektronskim vezjem upoštevati, da je uho za sestavine pri manjši frekvenci od 2000 Hz in pri večji frekvenci od 4500 Hz manj občutljivo (slika 3). Merilnik potem pokaže glasnost v dB(A), ki približno ustreza glasnosti v fonih. V tem primeru je bolje, da



**Slika 3.** Podatke v merilniku za glasnost v odvisnosti od frekvence pomnožimo s popravkom A, da dobimo glasnost v dB(A), ki je blizu glasnosti v fonih. Krivulja približno ustreza obratni vrednosti obrisa enake glasnosti za 40 fonov. Tudi ta diagram je dvojno logaritičen. Pomnožimo tako, da logaritem prištejemo, delimo pa tako, da logaritem odštejemo. Popravek C je bolj raven in da glasnost v dB(C), kar je blizu glasnosti v decibelih. Popravek B se redko uporablja. [http://www.sfu.ca/sonic-studio/handbook/Sound\\_Level\\_Meter.html](http://www.sfu.ca/sonic-studio/handbook/Sound_Level_Meter.html)

podatki niso zelo natančni. Tako smo na koncu bolje spoznali pomen količine, s katero smo začeli prispevek o hrupu.

Jakost zvoka  $j = \frac{1}{2} c \rho (2 \pi v s_0)^2 = \frac{1}{2} p_0^2 / (c \rho)$ ,  $c$  hitrost zvoka,  $\rho$  gostota snovi,  $v$  frekvenca,  $s_0$  amplituda odmika,  $p_0 = 2 \pi v c \rho s_0$  amplituda tlaka. Na slišnem pragu je pri frekvenci 1000 Hz v zraku v navadnih okoliščinah  $s_0 = 1,1 \cdot 10^{-11}$  m in  $p_0 = 2,8 \cdot 10^{-5}$  N/m<sup>2</sup>.

Glasnost v decibelih je  $g = 10 \log(j/j_0)$ , log pomeni desetiški logaritem.