

9. OSNOVNI PRINCIPI RADA ČULA SLUHA

9.1 Uvod

Čulo sluha čoveka predstavlja prirodni sistem senzora koji omogućava percepciju zvučnih pojava iz okoline. Taj sistem se sastoji od dva uva koji su prostorno razdvojeni glavom kao fizičkom preprekom. Pod uticajem fizičkih nadražaja iz okruženja u svesti slušaoca stvaraju se odgovarajuće zvučne senzacije, odnosno zvučne slike o izvorima zvuka i njihovom položaju u prostoru. U inženjerskom smislu čulo sluha predstavlja krajnju tačku, odnosno izlaz svakog telekomunikacionog sistema kada se kroz njega prenosi zvučni signal. Zajedno sa vokalnim traktom, čulo sluha čini sistem za komunikaciju ljudi pomoću zvuka kao nosioca informacija. Po svojim akustičkim osobinama čulo sluha je prilagođeno prijemu zvuka u vazduhu, jer je vazduh čovekovo prirodno okruženje. Tokom evolucije uvo je svojom građom prilagođeno akustičkoj impedansi vazduha čime je omogućen maksimalni odziv na zvučnu pobudu.

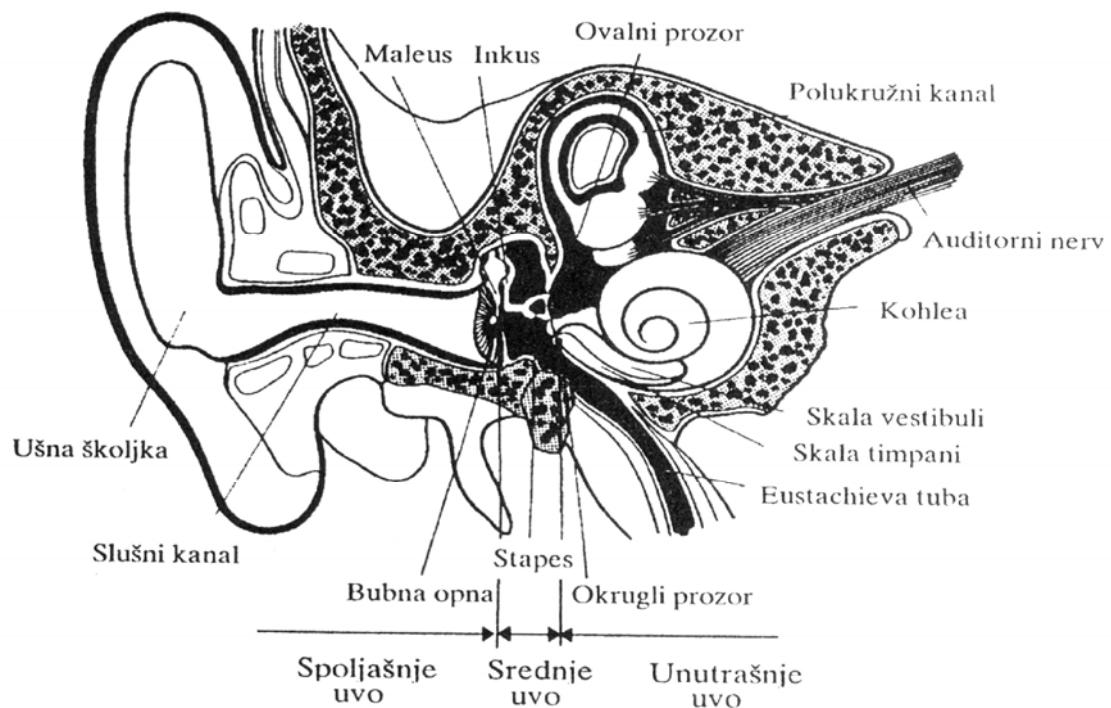
Iako je čulo sluha jedan senzorski sistem, postoje bitne razlike koje ga razdvajaju od senzora koji se koriste u tehnici, kao što su to na primer mikrofoni. Prvo, čulo sluha registruje zvuk, ali ga i procesira, što znači analizira i na osnovu toga u svesti stvara složene zvučne slike. Što je zvuk koji se prima po svom fizičkom sadržaju složeniji, to je kompleksnija zvučna slika koja nastaje u svesti slušaoca. Drugo, u građi čula sluha i njegovim funkcijama postoje neminovne individualne razlike među ljudima. Svi numerički ili grafički pokazatelji kojim se ilustruju pojedine osobine i rad ovog čula dobijeni su usrednjavanjem na osnovu osobina velikog broja osoba. Zbog toga se podaci o čulu sluha moraju shvatati kao statistički pokazatelj, a ne kao precizni tehnički podaci.

Čulo sluha kod čoveka može se podeliti na dve funkcionalne celine: na fizički i na psihološki deo. Fizički deo čini sve ono što se anatomske svrstava u čulo sluha. To su dva uva, nervni putevi i centri u kori velikog mozga. Psihološki deo čini nematerijalna sfera psihološkog reagovanja na fizičku pobudu koja kao rezultat daje zvučnu sliku u svesti slušaoca. U funkcionalnom smislu fizički deo čula sluha posreduje između zvučnog polja i svesti. Ovakva podela čula sluha vremenom je učinila da se u akustici razviju dve relativno nezavisne podoblasti koje se bave čulom sluha i slušanjem. To su fiziološka akustika, koja se bavi fizičkim delom čula, i psihološka akustika koja se bavi nematerijalnim delom rada čula, odnosno formiranjem zvučne slike.

Opis rada čula sluha podeljen je na dva poglavlja, ovo i naredno. U ovom poglavlju prikazana je fizička struktura čula sluha i osnovne funkcije uva kao njegovog senzorskog dela, to jest ono što predstavlja predmet izučavanja fiziološke akustike. Oblast psihoakustike ovde nije šire obrađivana.

9.2 Fizički deo čula sluha

U svakodnevnom životu pojam čula sluha najčešće se vezuje uz pojam uva kao delimično vidljivog dela ovog senzorskog sistema. Struktura građe uva prikazana je na slici 9.1. Prikazan je presek kroz centralnu ravan desnog uva. Vidi se da je građa ovog organa relativno složena. Ona se u anatomske, ali i u funkcionalnom smislu, deli na tri celine: spoljašnje, srednje i unutrašnje uvo. Ova podela ide anatomske jasnim granicama i označena je na slici. Spolja posmatrano, na glavi je vidljivo samo spoljašnje uvo. Srednje i unutrašnje uvo nalaze se u šupljinama kosti glave, čime su u znatnoj meri zaštićeni od eventualnih mehaničkih oštećenja, od promene temperature, vlažnosti sredine itd.



Slika 9.1 – Izgled uva u preseku kroz njegovu centralnu ravan.

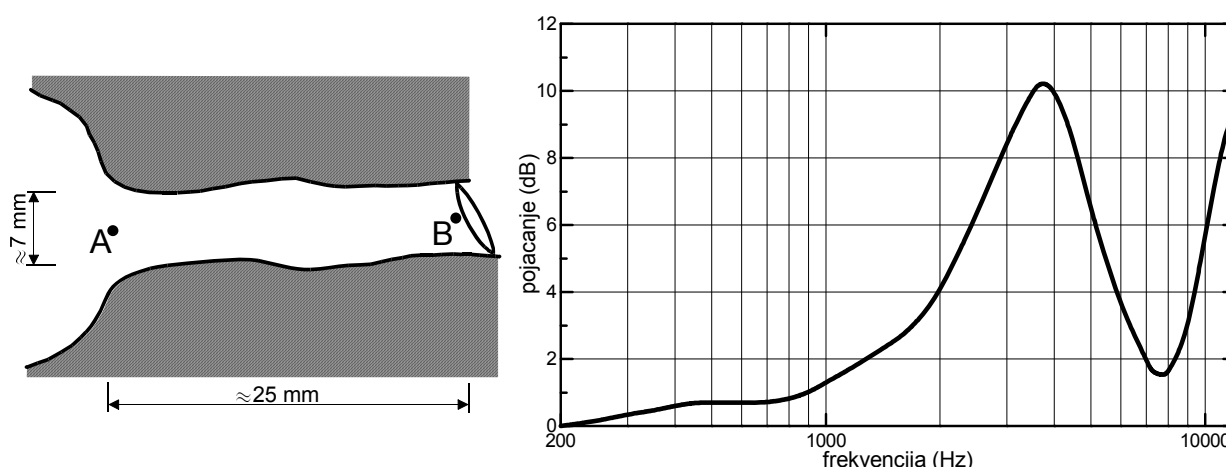
Delovi i funkcija spoljašnjeg uva

Spoljašnje uvo čine ušna školjka i slušni kanal. Ušna školjka je hrskavičava tvorevina pokrivena kožom, formirana asimetrično oko otvora slušnog kanala. Grubo posmatrano, ušna školjka ima levkast oblik. Površina okrenuta spoljašnjoj sredini ima na sebi grebenaste reljefne forme koje se oblikom i veličinom u izvesnoj meri razlikuju od osobe do osobe. Dimenzije ušne školjke su reda centimetara (dužina oko 7 cm), pa ona u oblasti veoma malih talasnih dužina utiče kao fizička prepreka na prijem zvuka. Na niskim frekvencijama ona nema uticaja na percepciju zvuka. Individualne razlike u veličini i građi ušne školjke utiču na izvesne individualne razlike koje postoje u procesu percepcije zvuka.

Slušni kanal je cev dužine 25-30 mm i prečnika oko 7 mm. Na kraju kanala nalazi se bubna opna, tako da je to u akustičkom smislu cev otvorena na jednom svom kraju i zatvorena na drugom. Slušni kanal ima funkciju zvukovoda koji vezuje srednje uvo sa spoljašnom sredinom. Kroz njega se iz spoljašnje sredine prostire zvučni talas na putu ka bubnoj opni. Ovaj kanal ima i zaštitnu ulogu jer oblikom i dužinom mehanički štiti bubnu opnu od eventualnih spoljašnjih uticaja.

Na slici 9.2 prikazan je izgled slušnog kanala u preseku. Za slučaj dimenzija označenih na slici je prikazana njegova prenosna karakteristika. Ona je definisana kao odnos odziva i pobude, to jest kao razlika nivoa zvuka na površini bubne opne (tačka B) i ulaza u kanal (tačka A). Sa dijagrama se vidi da slušni kanal unosi izvesno selektivno pojačanje u nekim oblastima frekvencija. Ono je posledica pojave rezonanci u cevi koje utiču na povećanje nivoa zvuka na bubnoj opni. Pošto slušni kanal predstavlja cev zatvorenu s jedne strane, u njemu se javljaju rezonance ilustrovane tipa kao na slici 8.15. S dužinom koju prosečno ima, prva rezonanca kanala je u oblasti 3 – 4 kHz. Individualne varijacije dimenzija slušnog kanala od osobe do osobe čine da i frekvencije njegovih rezonanci variraju u nekom malom intervalu.

Pojačanje koje prva rezonanca slušnog kanala unosi u njegovu funkciji prenosa reda je veličine 10 dB. Kasnije će biti pokazano da je upravo u toj oblasti frekvencija ljudsko uvo najosetljivije, što je očigledan doprinos slušnog kanala. Druga rezonanca kanala javlja se u oblasti iznad 10 kHz, i njen uticaj je takođe vidljiv u karakteristici uva.



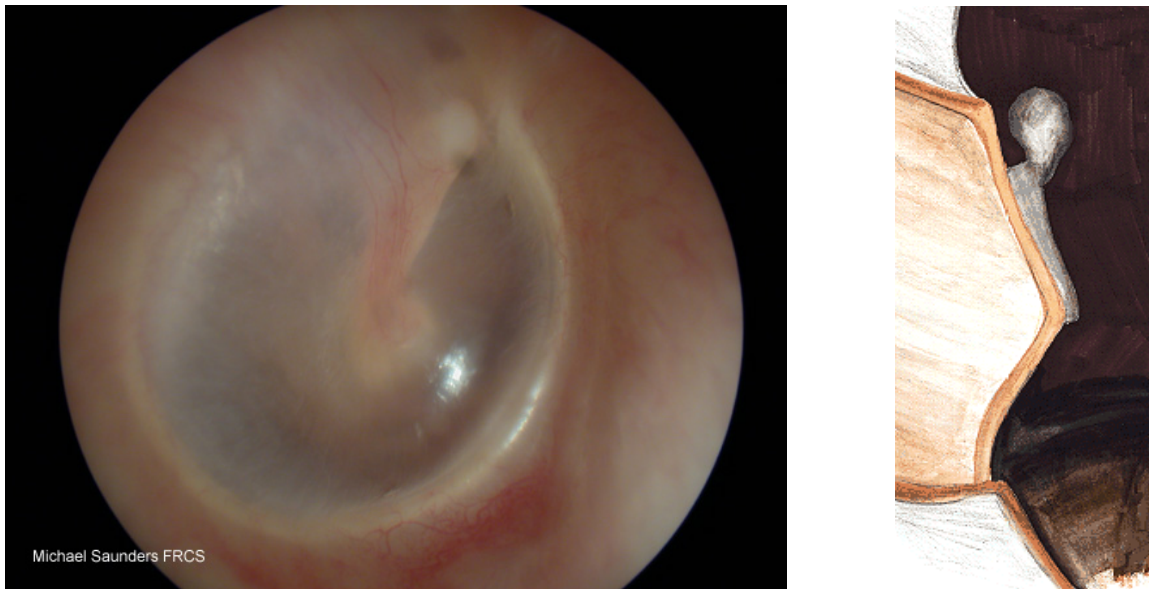
Slika 9.2 – Izgled slušnog kanala i prenosna karakteristika za slučaj kanala sa dimenzijama označenim na slici.

Delovi i funkcija srednjeg uva

Srednje uvo ima posredničku ulogu između vazdušne sredine, koja se završava bubnom opnom, i unutrašnjeg uva u kome se nalaze senzori. To je jedna vazdušna šupljina u kojoj se nalaze: bubna opna, tri slušne koščice sa pratećim ligamentima i mišićima, i membrana prema unutrašnjem uvu koja se naziva "ovalni prozor". Šuljina srednjeg uva je povezana sa usnom dupljom jednom kapilarnom cevčicom koja se naziva eustahijeva tuba. Svi ovi delovi vidljivi su na slici 9.1.

Bubna opna ima funkciju akustičko-mehaničkog pretvarača jer transformiše zvučne vibracije iz vazduha u mehaničke vibracije slušnih koščica koje se nalaze iza

nje. To je vrlo tanka membrana, debljine oko 0,1 mm. Fotografija njenog spoljašnjeg izgleda prikazana je na slici 9.3. Vidi se da je zbog male debljine ona skoro providna, pa se kroz nju nazire privezana prva slušna košćica ("čekić"). Zbog tako male debljine bubna opna je lako podložna cepanjima pod dejstvom veoma jakih zvučnih pobuda. Na slici 9.2 vidi se da je bubna opna postavljena pod izvesnim uglom u odnosu na osu slušnog kanala. U realnosti ona nije ravna, kao što su ravne membrane raznih mikrofona, već ima izražen konusni oblik.



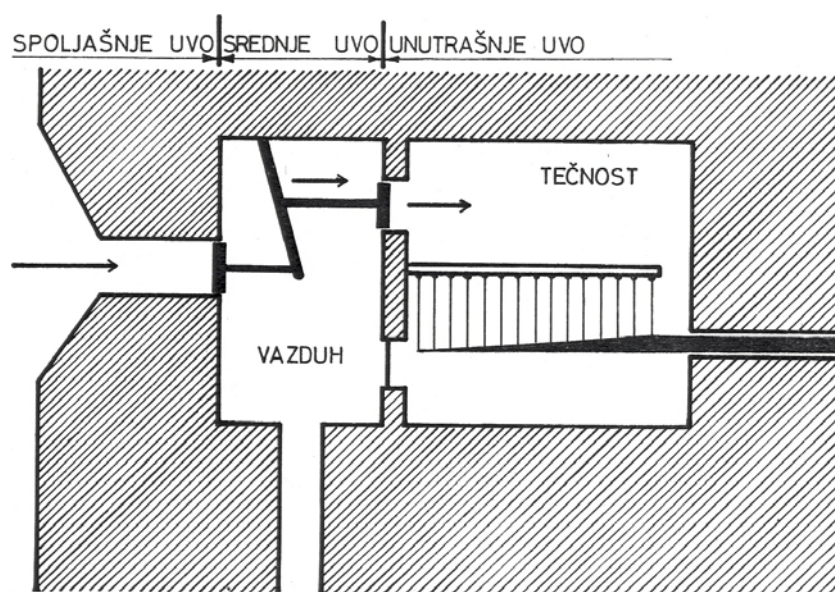
Slika 9.3 – Fotografija bubne opne (levo) i skica njenog izgleda u preseku (desno).

Zbog konusnog oblika bubne opne, vidljivog na slici 9.3 i zbog činjenice da je jedan mali mišić stalno drži u zategnutom stanju, bubna opna ne radi kao jednostavna pasivna membrana. Struktura njenog oscilovanja relativno je složena, jer na različitim frekvencijama različiti delovi opne učestvuju u oscilovanju. Tako se s porastom frekvencije smanjuje efektivna površina opne koja učestvuje u oscilovanju.

Eustahijena tuba je tanka cevčica, vidljiva na slici 9.1. Ona je sastavni deo srednjeg uva i spaja centralnu šupljinu srednjeg uva sa usnom dupljom. Na najužem delu njen prečnik je oko 1 mm. Preko eustahijeve tube se, po potrebi, ostvaruje vazдушna veza između spoljašnje sredine i komore srednjeg uva, što znači između spoljašnje i unutrašnje strane bubne opne. To omogućava izjednačavanje pritiska sa dve strane opne, čime se sprečava njena reakcija na promene statičkog, odnosno atmosferskog pritiska. Ovakva kompenzacija je veoma važna pri letenju avionom a posebno pri ronjenju, kada spoljašnji pritisak na bubnu opnu može višestruko da premaši vrednost normalnog atmosferskog pritiska. Ova cev je u normalnim okolnostima zatvorena, ali se pri gutanju ili zevanju otvara. Zbog toga je pri naglim promenama spoljašnjeg pritiska potrebno ponavljati gutanje da bi se otvaranjem eustahijeve tube izjednačavao pritisak sa spoljašnje i unutrašnje strane bubne opne. Kada je cev otvorena, sopstveni glas čuje se jače i sa promenjenom bojom, jer zvuk iz usne duplje dospeva kroz tubu direktno u srednje uvo.

Upalni procesi mogu učiniti da se zbog oticanja sluzokože eustahijeva tuba ne može otvoriti. Tada ne postoji mogućnost kompenzacije pritiska, što prouzrokuje bol u ušima pri promenama statičkog pritiska. U takvim okolnostima nije moguće ronjenje, jer se već na vrlo malim dubinama javlja jak bol u ušima.

Slušne košćice sačinjavaju mehanički sistem prenosa vibracija sa bubne opne na ovalni prozor koji se nalazi na suprotnoj strani unutrašnjeg uva. Zvuk se kroz taj sistem prenosi u obliku vibracija košćica. Unutrašnje uvo je ispunjeno tečnošću. Kada srednje uvo ne bi postojalo i kada bi zvuk iz vazduha direktno pobuđivao membranu iza koje je tečnost unutrašnjeg uva, razlika u impedansama vazduha i tečnosti učinila bi prenos zvučne energije iz spoljašnje sredine do senzora veoma neefikasnim. Sistem košćica srednjeg uva ima funkciju transformatora akustičke impedanse prilagođavajući u izvesnoj meri impedansu vazdušne sredine na impedansu tečnosti. Šematski prikaz rada srednjeg uva sa koga je jasnija njegova uloga transformatora prikazan je na slici 9.4. Osnova funkcije slušnih košćica je način na koji su one međusobno povezane. Vidi se da košćice deluju kao sistem poluge. Relativno veliki hod bubne opne koja na košćice deluje malom silom transformiše se u veću silu koja malim hodom deluje na ovalni prozor koji predstavlja ulaz unutrašnjeg uva.



Slika 9.4 - Šematski prikazi rada srednjeg uva

Zaštitni efekat srednjeg uva

Život na zemlji evoluirao je u relativnoj tišini koja je vladala u prirodi, sve do industrijske revolucije. Tada su se u čovekovom okruženju pojavile okolnosti u kojima je čulo sluha izloženo jakim zvučnim pobudama. Vremenski period koji je protekao od tada suviše je kratak da bi doneo bitne promene u evoluciji čovečijeg organizma. Zbog toga uvo tokom evolucije nije dobilo neku prirodnu zaštitu protiv prekomernog zvučnog nadražaja, kao što to na primer ima čulo vida (očni kapci). Život na kopnu evoluirao je u prisustvu jake svetlosti od sunca, pa su sve životinjske vrste dobile očne kapke kao zaštitu. U nedostatku adekvatne biološke zaštite, zaštita čula sluha od prekomernih zvukova postala je ekološka tema, pa se mogućnost zaštite traže u sferi zakonodavstva, koje propisima reguliše postavljanje i korišćenje izvora zvuka (pravila ponašanja) i u sferi fizičkih sredstava za zvučnu zaštitu, a to su pregradne konstrukcije kojima se čovek okružuje.

Jedini zaštitni mehanizam koji čovečiji organizam ipak poseduje za borbu protiv prekomernih zvukova nalazi se u prenosnom sistemu srednjeg uva. Postoje dva efekta koja deluju u tom smislu: inercija slušnih košćica i razdešavanje njihovog prenosnog

sistema. Iako su slušne koščice veoma lagane (čekić i nakovan oko 20 mg, uzengija 2-4 mg) njihova inercija predstavlja izvesnu zaštitu od naglog dejstva zvučnih vibracija (pucnjevi i slične pojave). Razdešavanje prenosnog sistema koščica nastaje pod dejstvom povratne sprege iz moždanih centara i naziva se akustički refleks. Realizuje se odgovarajućim reakcijama mišića koji kontroliše pomeranje koščica. Akustički refleks ima konačnu brzinu reagovanja koja zavisi od nivoa zvučne pobude. Vreme tog reagovanja je u intervalu 0,1–0,3 s. Ovaj mehanizam deluje pri zvučnim pobudama koje su svojim nivoom iznad 65-70 dB i njegov efekat približno linearno raste sa porastom pobude. Maksimalno slabljenje zvuka delovanjem akustičkog refleksa je oko 20 dB.

Delovi i funkcija unutrašnjeg uva

Unutrašnje uvo je smešteno u koštanim kanalima i ispunjeno tečnošću. Sastoji se od jednog spiralno smotanog kanala koji se naziva kohlea, i u kome se nalaze slušni receptori. Kohlea ima ukupnu dužinu oko 35 mm, i smotana je u obliku puža sa nešto više od 2,5 navoja. U svojoj unutrašnjosti kohlea je jednom pregradom uzdužno podeljena na dva dela. Pregrada se naziva bazilarna membrana i ona odvaja prostor kohlee na gornji i donji deo. U samom vrhu između gornjeg i donjeg dela nalazi se otvor, tako da tečnost može slobodno da cirkuliše između dva dela prostora kohlee.

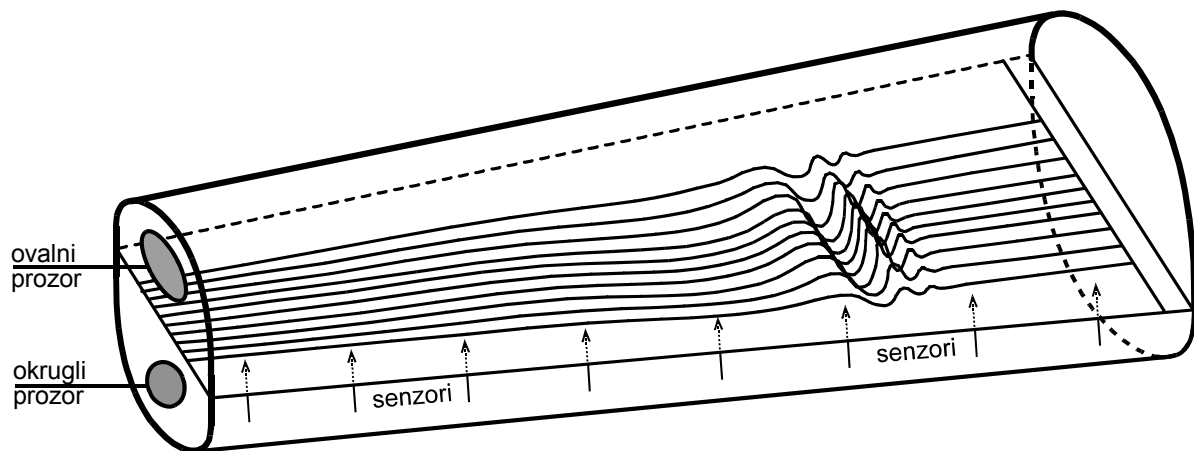
Na početku kohlee, u njenoj bazi, nalaze se dve male membrane označene na slici 9.4. Na gornjoj, koja se naziva ovalni prozor, pripojena je jedna od slušnih koščica (uzengija) i preko nje se vrši zvučna pobuda unutrašnjosti kohlee. Donja, koja se naziva okrugli prozor, ima pasivnu funkciju. Pošto je tečnost u unutrašnjosti kohlee nestišljiva, svako pomeranje ovalnog prozora prema unutrašnjosti kohlee mora da prati odgovarajuće kretanje okruglog prozora prema spoljašnosti, i obrnuto. Ovakav rad dve membrane (takozvani "puš-pul") omogućava zvučnu pobudu unutrašnjosti kohlee.

Na donje strane bazilarne membrane, čitavom njenom dužinom, nalaze se receptorske ćelije koje reaguju na svaki njen pokret, kao što je prikazano na slici 9.4. Mehanička pomeranja pri oscilovanju membrane izazivaju pobudu senzorskih ćelija, što kao rezultat daje odgovarajuću nervnu aktivnost kojom se nadražaj prenosi do centara u mozgu.

Procesi na bazilarnoj membrani

Za razumevanje procesa koji se dešavaju pri formiranju zvučne slike veoma je značajno sagledavanje prirode fizičkog procesa na bazilarnoj membrani. Širina bazilarne membrane nije konstantna. U zoni baze, to jest pri ulazu uža, a širi se ka njenom vrhu. Kao takva, ona predstavlja mehanički sistem koji ima svoje rezonance. One se javljaju poprečno u odnosu na dužinu membrane. Frekvencija rezonance kontinualno se menja duž njenih 35 mm dužine, a određena je zategnutošću u poprečnom pravcu i drugim mehaničkim svojstvima. Najviša frekvencija mehaničke rezonance bazilarne membrane je oko 20 kHz i javlja se na samom njenom početku, neposredno pored ovalnog prozora. Najniža frekvencija rezonance je oko 20 Hz i javlja se na kraju bazilarne membrane, u zoni najudaljenijoj od ovalnog prozora. Pri zvučnoj pobudi preko ovalnog prozora zvučna pobuda dospeva u unutrašnje uvo. Kao odziv na tu pobudu pojavljuju se oscilacije bazilarne membrane. Način na koji se javljaju zvučne oscilacije bazilarne membrane prikazan je principijelno na slici 9.5. Oscilacije koje nastanu na njenom početku prenose se u vidu progresivnog talasa koji se kreće duž

membrane. Odziv na oscilatornu pobudu funkcija je njene fizičke strukture i ivičnih efekata. Ovde se pod ivičnim efektima podrazumeva zategnutost membrane.



Slika 9.5 - Principijelna skica oscilovanja bazilarne membrane pri zvučnoj pobudi.

Vibracije koje dospevaju iz srednjeg uva prostiru se duž bazilarne membrane sve do mesta gde se pobudna frekvencija poklapa sa frekvencijom sopstvene mehaničke rezonance membrane. Tu energija talasa pobuđuje njenu sopstvenu rezonancu, što rezultuje maksimalnom amplitudom vibracija. U toj zoni membrane kretanje talasa se zaustavlja, jer sva njegova energija biva apsorbirana od strane rezonantnog procesa membrane. Pri pobudi samo jednom frekvencijom iza tog mesta membrana ostaje u stanju mirovanja, kao što je predstavljeno na slici 9.5. Prema tome, maksimum vibracija pri nekoj zvučnoj pobudi jedne frekvencije javlja se na mestu membrane gde se njena sopstvena poprečna rezonanca poklapa sa pobudnom frekvencijom.

Vibraciono kretanje bazilarne membrane čitavom njenom dužinom registruju receptorske ćelije. Na osnovu toga centri u mozgu kontinualno dobijaju sliku stanja vibracija cele bazilarne membrane, bez obzira na vrstu pobude, a zvučna slika se formira na osnovu takvog kompleta informacija koje dospevaju iz unutrašnjeg uva. Na mestu rezonance reakcija senzora je samo najintenzivnija, ali informacije mozgu šalju sve pobuđene ćelije srazmerno lokalnom intenzitetu pobude. Centri u mozgu u svakom trenutku imaju sliku oscilatorne pobuđenosti bazilarne membrane, i na osnovu takve kompleksne informacije formiraju svest o frekvenciji i drugim atributima primljenog zvuka. Prema tome, fizička zbivanja na bazilarnoj membrani ključna su za ukupni procesu slušanja.

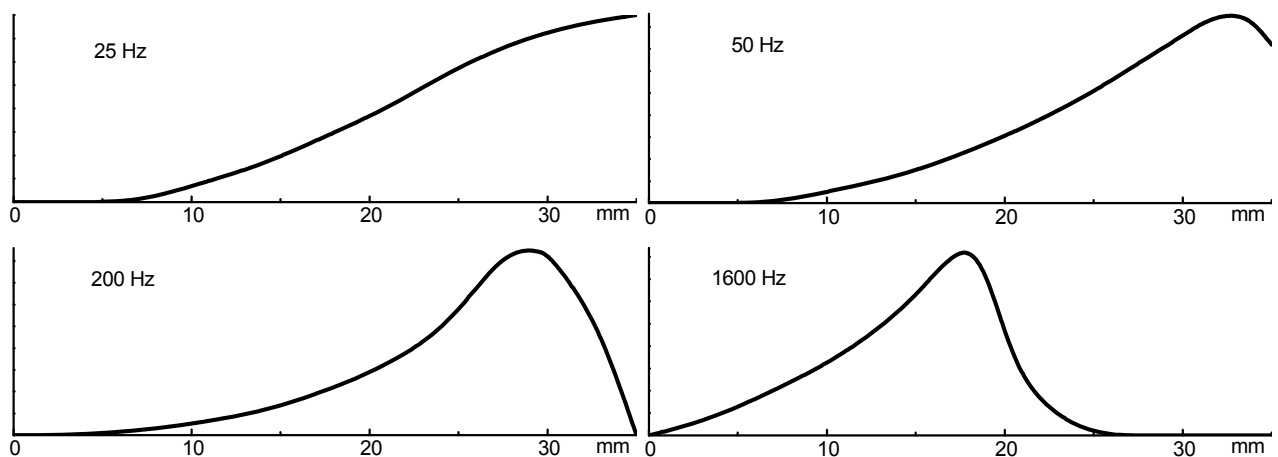
Frekvencijska raspodela odziva duž bazilarne membrane – teorija položaja

Raspodela rezonantnih frekvencija duž bazilarne membrane nije linearna. Na slici 9.6 prikazana je jedna ilustracija relativne vibracione pobude na membrani pri zvučnoj pobudi tonovima četiri različite frekvencije: 25 Hz, 50 Hz, 200 Hz i 1600 Hz. Vidi se da se maksimum odziva na frekvenciji 1600 Hz nalazi približno u zoni sredine bazilarne membrane. Sa slike se takođe vidi da pomak od samo 25 Hz na najnižim frekvencijama (od 25 Hz do 50 Hz) znači pomeranje maksimuma pobude za približno 10% ukupne dužine bazilarne membrane.

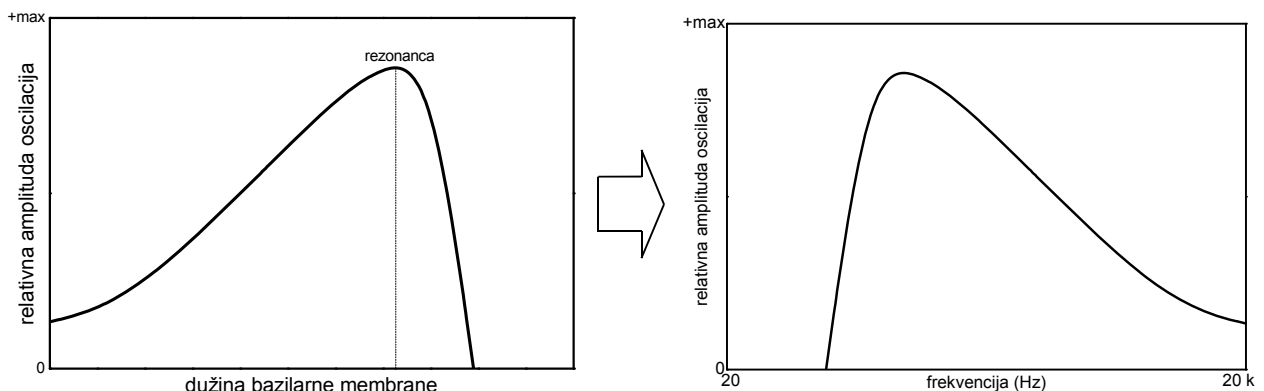
Raspored senzorskih ćelija koje registruju kretanje duž bazilarne membrane približno je linearan, pa je njihova gustina jednaka po jedinici dužine membrane. U toj činjenici krije se objašnjenje logaritamske zavisnosti čula sluha po frekvencijama. Sa

slike 9.6 vidi se da to ima fiziološko opravdanje, jer je pri pobudi frekvencijom oko 1000 Hz maksimum vibracione pobude blisko sredini bazilarne membrane.

Iz prikaza reakcije bazilarne membrane na zvučnu pobudu sledi da i pri pobudi čistim sinusnim tonom postoji reakcija svih senzorskih ćelija od početka membrane do zone u kojoj se javlja rezonanca, s tim što je na mestu rezonance reakcija senzora najintenzivnija. Ovakav fizički odziv uveo je u objašnjenje percepcije visine zvuka takozvanu "teoriju položaja". Pod položajem se podrazumeva mesto maksimuma na bazilarnoj membrani. Za svaku pobudnu frekvenciju postoji jedan lokalizovani maksimum vibracija, pa je doživljaj visine tona određen njegovim položajem tog maksimuma.



Slika 9.6 – Šematska ilustracija relativne promene amplitude vibracija duž bazilarne membrane za četiri različite pobudne frekvencije.



Slika 9.7 - Šematski prikaz obvojnice amplituda vibracija bazilarne membrane kada je pobuđena zvukom jedne frekvencije kao funkcija dužine membrane (levo) i kao funkcija frekvencije (desno).

Na slici 9.7 šematski je prikazan dijagram oblika obvojnice amplitude vibracija bazilarne membrane nacrtan na dva načina: kao funkcija dužine membrane i kao funkcija frekvencije (frekvencijska osa je nacrtana u logaritamskoj razmeri). Početak membrane, odmah uz ovalni prozor, ima rezonance na najvišim čujnim frekvencijama, a najniže frekvencije su na njenom kraju. Zbog toga su krive pobude na dva prikazana dijagrama međusobno simetrične.

Koštana provodnost

Put zvučne energije kroz spoljašnje i srednje uvo anatomskim i funkcionalnim osobinama maksimalno je prilagođen efikasnom prenosu energije. Činjenica je da zvučno polje deluje na čitavu površinu glave slušaoca, ali zbog razlike u impedansi kosti i vazduha efikasnost zvučne pobude kosti glave je mala. Međutim, površina kostiju znatno je veća od površine slušnog kanala, pa zbog toga količina energije koja preko kosti stiže do unutrašnjeg uva ipak u ukupnoj sumi nije sasvim zanemarljiva. Pojava da zvuk iz spoljašnje sredine dospeva do tečnosti unutrašnjeg uva preko kostiju glave, paralelno putanji kroz srednje uvo, naziva se koštana provodnost.

Ukupna pobuda unutrašnjeg uva zvučnom energijom koja stiže preko kosti glave za nekoliko redova veličine je manja od energije koja stiže regularnim vazдушnim putem. Ipak, njen doprinos u nekim okolnostima može se primetiti. Na primer, koštana provodnost određuje maksimalne domete zaštite uva sa zaštitnim čepićima koji se stavljaju direktno u slušni kanal. Čak i kada bi oni unosili beskonačno slabljenje, ukupni rezultat zaštite sveo bi se na ono što se čuje preko koštane provodnosti. Zbog toga samo sa zaštitnom kacigom koja štiti čitavu površinu glave moguće je ostvariti više nivoa zaštite.

9.3 Oblast čujnosti zvuka

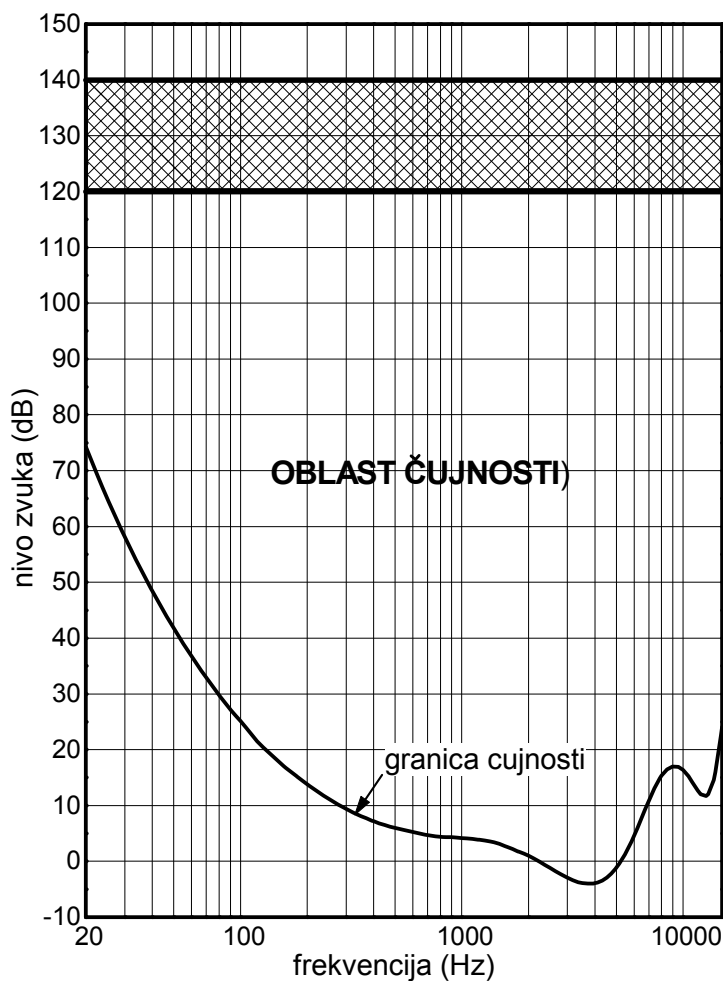
Percepcija zvuka je funkcija dve dimenzije: frekvencije i nivoa zvučne pobude. Sa jedne strane, postoje perceptivna ograničenja po frekvencijama jer uvo reaguje na zvučne nadržaje samo u jednom intervalu frekvencija koje se nazivaju čujne frekvencije. Nominalne granice čujnog opsega frekvencija utvrđene su na 20 Hz (donja) i 20.000 Hz (gornja). S druge strane, postoji granica intenziteta nadražaja ispod koje mehanizam čula sluha ne reaguje. Ona se naziva "granica čujnosti". Potrebno je na uvo dovesti nadražaje koji su iznad te granice da bi se stvorila zvučna senzacija. Zbog toga je jasno da postoje široke oblasti zvučnih pojava koje čulo sluha ne može registrovati.

Dijagram oblasti čujnosti

Fizičke granice mogućnosti percepcije čula sluha prikazuju se dvodimenzionalnim dijagramom koji je prikazan na slici 9.8. Označena površina se naziva oblast čujnosti. Neki autori je nazivaju i "slušno polje". Prikazana oblast čujnosti karakteriše zdravo ljudsko uvo. Pojam zdravog čula sluha se u literaturi obično označava izrazom "otološki normalni subjekt" (otologija je deo otorinolaringologije koja se bavi čulom sluha). Postoji niz faktora koji tokom života mogu da promene granice oblasti čujnosti. To su preležane bolesti, prekomerni uticaj visokih nivoa zvuka, upotreba nekih lekova, proces starenja, itd.

Oblast čujnosti kao površina u ravni frekvencija - nivo zvuka jasno je ograničena sa svoje desne, donje i leve strane. S donje strane oblast čujnosti je ograničena takozvanom "granicom čujnosti", a sa leve i desne strane najnižom, odnosno najvišom čujnom frekvencijom. Granica čujnosti definiše najniži nivo zvuka po frekvencijama koji čulo sluha može da percipira. Sa slike 9.8 vidi se da je granica čujnosti veoma nelinearna. Razlika u nivou zvuka koji odgovara granicama čujnosti na 20 Hz i 1 kHz je oko 70 dB. To znači da je nivo najtišeg zvuka na najnižim čujnim frekvencijama oko

70 dB iznad nivoa najtišeg zvuka u centralnom delu čujnog frekvencijskog opsega. Takav podatak ilustruje činjenicu da je uvo veoma nelinearan senzor zvuka.



Slika 9.8 - Oblast čujnosti zdravog ljudskog uva

Gornja granica oblasti čujnosti u geometrijskom smislu ne postoji. Zato je u toj zoni nacrtan pojas označen šrafurom. Amplitude oscilovanja pokretnih delova pri velikim pobudama mogu premašiti granice anatomskih mogućnosti. Kao rezultat, s povećanjem nivoa pobude nastaje prvo nelagodnost, a zatim i bol. U tom delu razlikuju se granica neprijatnosti (koja se u literaturi uobičajeno definiše na oko 120 dB) i granica bola (oko 140 dB). To je zona veoma jake zvučne pobude pri kojoj se javljaju velike amplitude oscilovanja svih pomičnih delova (bubna opna, slušne koščiće, ovalni prozor, bazilarna membrana, okrugli prozor).

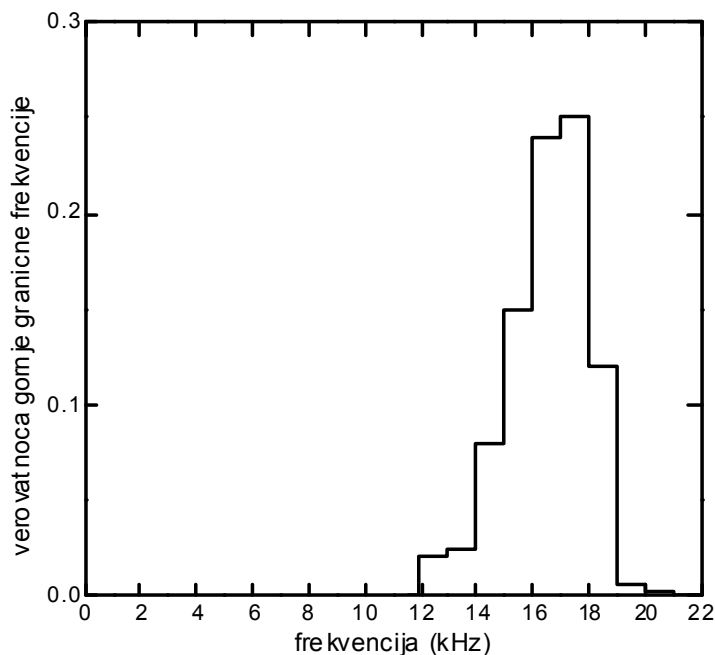
Prekoračenjem granice bola nastaje rizik mehaničkih oštećenja na pomičnim delovima i njihovim spojevima. U literaturi se navodi da je nivo zvuka oko 150 dB granica kada dolazi do mehaničkih oštećenja bubne opne i drugih nežnijih delova slušnog mehanizma koji učestvuju u oscilovanju.

Granične frekvencije čujnog opsega

Kao i sve drugo što se odnosi na čulo sluha, i nominalne granice čujnog opsega nisu konstante na način kako se u tehnici shvata pojam konstante. Usvojene nominalne vrednosti graničnih frekvencija 20 Hz - 20.000 Hz treba razumeti kao statističke

pokazatelje koji su dobijeni ispitivanjem na dovoljno velikom uzorku zdrave populacije. Podrazumeva se da kod raznih ljudi postoje individualne razlike, odnosno da su sasvim prirodna manja odstupanja tih vrednosti od osobe do osobe.

Donja granična frekvencija, nominalno usvojena na 20 Hz, specifična je zbog toga što pri snižavanju frekvencija funkcija uha postepeno prestaje, a postaje sve izraženija vibraciona reakcija glave, ali i ostalih delova tela. Vrlo precizna granica tog prelaza ne postoji, tako da usvojenu graničnu vrednost 20 Hz treba prihvatati sa izvesnom tolerancijom. U starijoj literaturi kao donja granica rada čula sluha redovno je navođena frekvencija 16 Hz, što na izvestan način pokazuje relativnost ovog podatka.



Slika 9.9 - Raspodela verovatnoće vrednosti gornje granične frekvencije čula sluha kod zdrave populacije

Gornja granična frekvencija, za koju se uobičajeno navodi vrednost 20.000 Hz, takođe je dobijena kao statistički pokazatelj. Istraživanja radi pouzdanog utvrđivanja ovog podatka posebno su intenzivno rađena krajem sedamdesetih godina zbog definisanja parametara digitalnih sistema koji su tada uvođeni u upotrebu. Merenja na zdravoj populaciji uzrasta od 15 do 50 godine i statistička obrada rezultata pokazala su da se ova granica može iskazati samo primenom verovatnoće. Rezultat takvog merenja pokazan je na slici 9.9. Dijagram pokazuje verovatnoću sa kojom se može očekivati da neka zdrava osoba ima vrednost gornje granične frekvencije čujnog opsega. Sa dijagrama se vidi da najviše ljudi čuje zvuk do 17-18 kHz (odnosno najveća je verovatnoća da čovek ima tu vrednost gornje granice). Isti dijagram pokazuje da oko 99% osoba ima gornju graničnu frekvenciju do 20 kHz. Zbog toga je ta vrednost frekvencije usvojena kao nominalna gornja granica čujnog opsega, smatrajući da je 99% slušalaca dovoljno velika ciljna grupa.

Oblik krive sa slike takođe pokazuje da postoje malobrojne osobe koje mogu čuti zvukove čije su frekvencije iznad 20 kHz. Ovi podaci se odnose na ispitivanu grupu opsega starosti 15-50 godina. Novija istraživanja pokazala su da među veoma mladim osobama oko 1% može registrovati frekvencije do granice od oko 25 kHz.

Jedna od bitnih odlika čula sluha je da njegov rad zavisi od nivoa zvuka pri kome se vrši slušanje. Taj uticaj postoji i kada je reč o graničnim frekvencijama. Sa slike 9.8 može se zaključiti da se teorijski optimalne vrednosti nivoa, kada se dostižu maksimalne

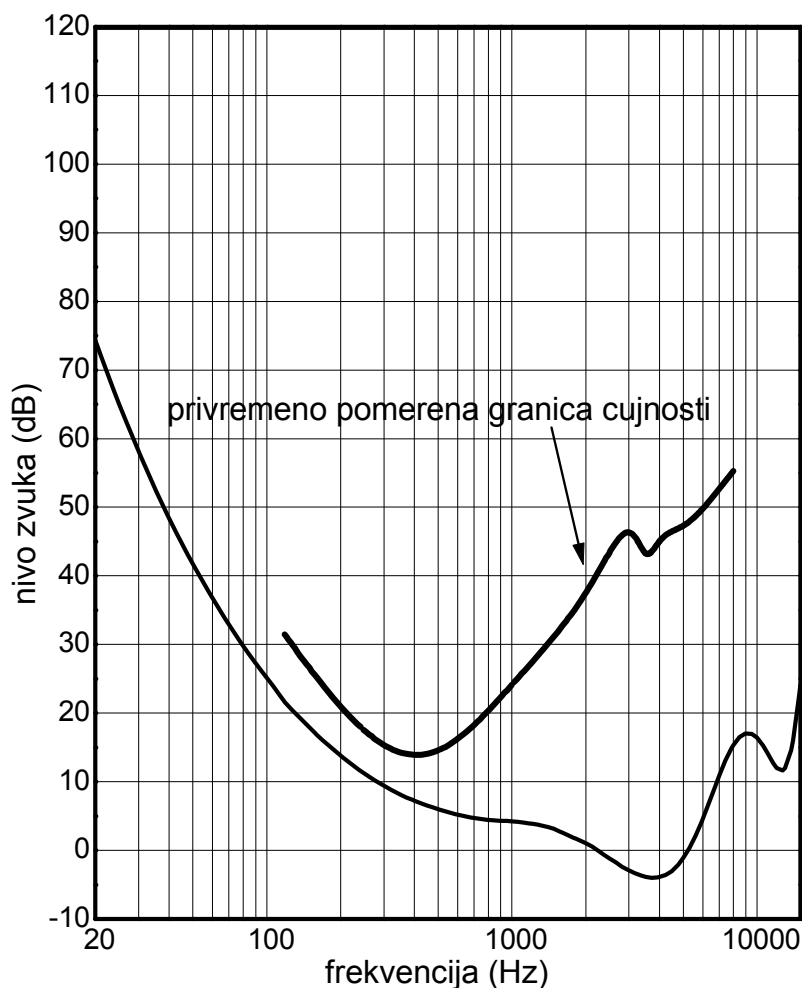
sposobnosti uha, nalaze u intervalu nivoa zvuka 80-90 dB, i tada se može govoriti o nominalnom intervalu opsega čujnih frekvencija 20-20.000 Hz. Pri nižim nivoima širina frekvencijskog opsega čujnosti se zbog oblika krive granice čujnosti sužava, pre svega sa donje strane.

Promene granice čujnosti

Granica čujnosti prikazana na slici 9.8 predstavlja prosečnu vrednost određenu na uzorku zdrave populacije. Dva su moguća slučaja kada se granica čujnosti pomera ka višim nivoima. To su:

- privremeni pomak nakon kraćeg dejstva visokih nivoa zvuka i
- trajni pomak usled starenja organizma, preležane bolesti ili zbog dugotrajne izloženosti visokim nivoima zvuka.

U okolnostima kada se zdravo čulo sluha izloži dejstvu visokih nivoa zvuka, bez obzira na njegov sadržaj (muzika ili šum), dolazi do zaštitnog delovanja srednjeg uva. Usled povećanog slabljenja na putu prenosa zvuka kao reakcija postiže se privremeno pomeranje granice čujnosti naviše. Na slici 9.10 prikazan je rezultat merenja ovakvog pomeranja nakon dvadesetominutnog boravka u ambijentu gde je reprodukovan beli šum ukupnog nivoa 115 dB. Merenje je izvršeno 30 sekundi nakon prestanka zvučne pobude.

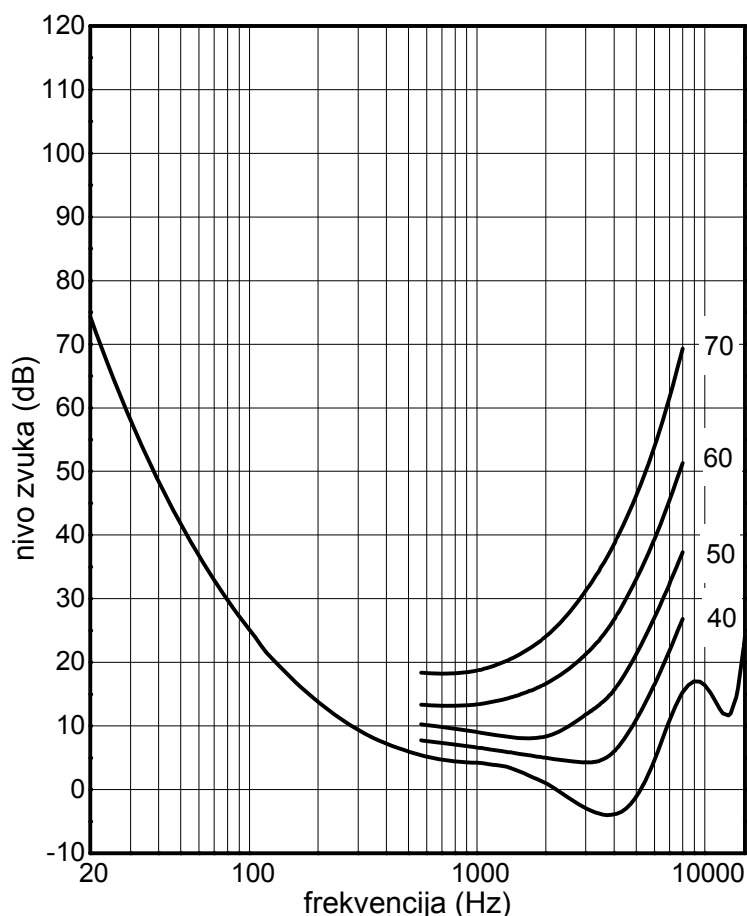


Slika 9.10 - Porast granice čujnosti izmeren 30 sekundi nakon što je čulo sluha bilo izloženo dejstvu belog čuma nivoa 115 dB u trajanju od 20 minuta

Ovakva deformacija u osetljivosti čula sluha se po prestanku pobude smanjuje. Proces relaksacije uva i vraćanja u normalu odvija se veoma lagano i asimptotski teži početnom stanju. Pri dovoljno snažnoj zvučnoj pobudi, kao što je primenjena u slučaju čiji je rezultat prikazan na slici, izvesno odstupanje od normale osetljivosti može se registrovati čak i 24 sata nakon prestanka pobude.

Pomeranja granice čujnosti može biti trajno. Ono nastaje na različite načine: prirodnim procesom koji se odvija starenjem organizma, izlaganjem prekomernoj buci duže od bioloških granica izdržljivosti bez dovoljno dugih perioda relaksacije, kao i usled nekih oboljenja unutrašnjeg uva. Na slici 9.11 prikazan je jedan rezultat ispitivanja prosečne, dakle prirodne promene granice čujnosti sa godinama starosti. Krive pokazuju prosečan položaj granice čujnosti kod ljudi starosti od 40 do 70 godina. Prikazane su prosečne krive dobijene kao rezultat statističke obrade rezultata snimljenih na velikom broju subjekata. Sa slike se vidi da pojava trajnog pomeranja granice čujnosti praktično znači sužavanje čujnog opsega u oblasti nižih nivoa zvuka. Percepcija najviših frekvencija tada je moguća tek pri visokim nivoima zvučne pobude.

Dijagram sa slike 9.11 pokazuje da gubitak osetljivosti čula sluha ne ugrožava percepciju jačih zvukova. Promene se najlakše detektuju smanjenjem razumljivosti govora. Naime, u govoru konsonanti imaju relativno malu energiju, pa se promene granice čujnosti prvo manifestuju težim prijemom takvih glasova. U strukturi govora konsonanti nose razumljivost izgovorene reči, pa pomeranje granice čujnosti naviše donosi ugrožavanje njihovog prijema. Istovremeno vokali u govoru nose relativno veliku energiju, pa govor ostaje i dalje glasan, samo sa poremećajem percepiranog smisla.



Slika 9.11 - Prosečne promene granice čujnosti sa godinama. (parametar na dijagramu je godina starosti)

9.4 Subjektivni doživljaj jačine čistih tonova – nivo glasnosti

Kada na uvo deluje čist sinusni ton, subjektivni doživljaj jačine zvuka nije linearna funkcija nivoa zvuka, odnosno intenziteta zvučne pobude. Ta osobina se jasno vidi iz oblika krive granice čujnosti sa slike 9.8, koja pokazuje da je najtiši zvuk koji se još može čuti promenljivog nivoa sa frekvencijama. Takva nelinearnost osetljivosti uslovljena je fizičkim i fiziološkim karakteristikama uva u svim njegovim delovima.

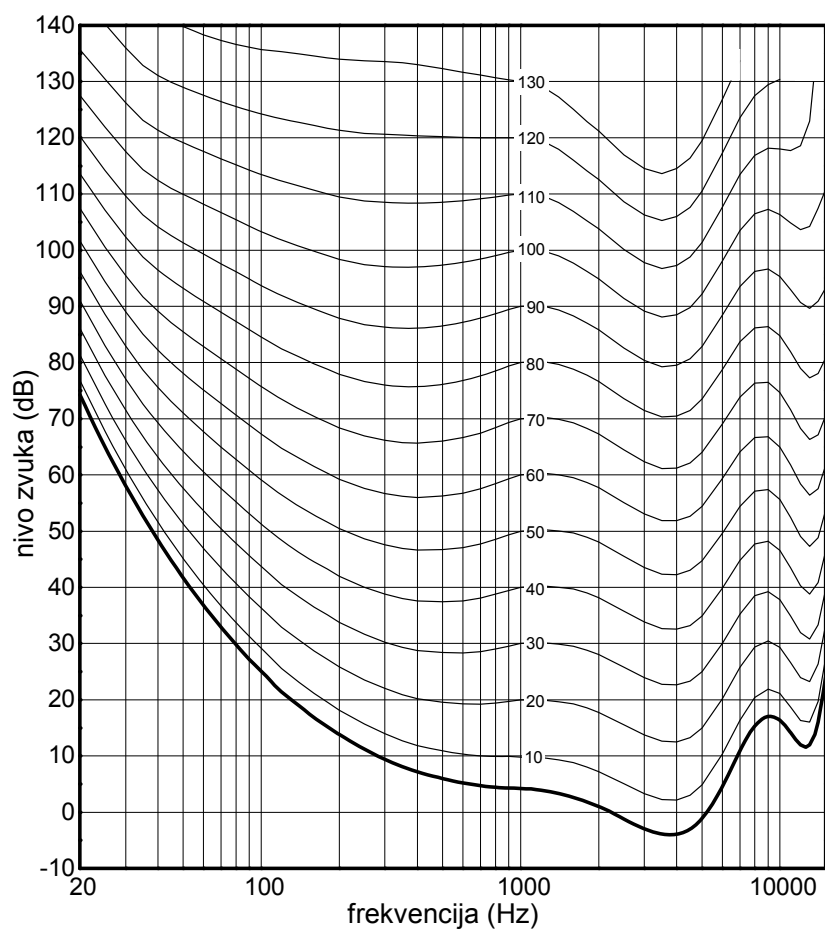
Doživljaji jačine prostog sinusnog zvuka jedne frekvencije izražava se vrednostima na posebno definisanoj skali. Veličina kojom se izražava subjektivni doživljaj jačine takvog zvuka naziva se nivo subjektivne jačine zvuka ili nivo glasnosti (*loudnes level*). Češće se koristi skraćeni naziv jačina zvuka. Za njeno izražavanje u literaturi koriste se oznake L ili L_N , i uvedena je jedinica koja se naziva *fon*.

Nivo subjektivne jačine zvuka pri slušanju sinusnih tonova utvrđen je eksperimentalno testiranjem na zdravoj populaciji. Na početku je konvencijom usvojeno da se skala nivoa subjektivne jačine zvuka u fonima na frekvenciji 1000 Hz poklapa sa skalom objektivno merenog nivoa zvuka u decibelima koji spolja deluje na uvo. Zbog činjenice da je izjednačena sa skalom nivoa zvuka, makar to bilo samo na jednoj frekvenciji (1000 Hz), skala u fonima ima odlike logaritamske veličine.

Za tonove čije su frekvencije niže ili više od 1000 Hz podaci o nivou subjektivne jačine zvuka utvrđeni su metodom slušnog poređenja dva zvuka različitih frekvencija: jednog koji je predmet ocene subjektivne jačine i drugog, referentnog, na 1000 Hz. Slušaocima je u takvom testu omogućeno da samostalno podešavaju nivo zvuka koji je predmet ocene i vrše poređenje subjektivnog doživljaja njegove jačine sa referentnim zvukom na 1000 Hz. Cilj testa je da slušalac podesi nivo tona koji sluša tako da on i referentni ton na 1000 Hz, što znači na različitim frekvencijama, budu subjektivno iste jačine pa tako da odgovaraju istom broju fona. Sukcesivnim ponavljanjem ovakve procedure za razne frekvencije i ucrtavanjem rezultata u dijagram oblasti čujnosti dobija se linija iste subjektivne jačine, takozvana izofonska linija. Svi tonovi koje se u prostoru frekvencija-nivo nalaze na jednoj izofonskoj liniji imaju subjektivno istu jačinu zvuka koja je jednaka onoj na 1000 Hz. Ponavljajući merenje pri raznim nivoima referentnog zvuka dobijena je familija izofonskih krivih kakve su prikazane na slici 9.12. Na slici su ucrtane krive u koracima od po 10 fona. Svaka kriva odgovara jednoj vrednosti subjektivne jačine zvuka u fonima.

Sa dijagrama izofonskih linija detaljnije se može sagledati nelinearnost čula sluha. Na primer, sa dijagrama se može očitati da subjektivnu jačinu od 70 fona na frekvenciji 4 kHz, gde je uvo najosetljivije, ima zvuk nivoa oko 60 dB, a na frekvenciji 20 Hz za istu subjektivnu jačinu potreban je nivo zvuka od preko 100 dB. Promene zakrivljenosti izofonskih linija pokazuju da se nelinearnost čula sluha u izvesnoj meri smanjuje sa povećanjem nivoa zvuka. To ne znači da njegov rad pri bilo kom nivou postaje linearan po frekvencijama, već pri višim nivoima zvuka samo dolazi do izvesnog smanjenja te nelinearnosti.

Pri dejstvu složenih zvukova koji se sastoje od više diskretnih komponenti ili koji imaju kontinualan spektar, subjektivni doživljaj jačine zvuka postaje složen fenomen. Može se reći da ne postoji potpuni model za određivanje subjektivnog doživljaja jačine složenih zvukova, ali se u praksi koristi nekoliko dovoljno tačnih algoritama. Svi oni prvenstveno polaze od spektra zvuka. U sledećem poglavlju su prikazane neke od osobina čula sluha koje utiču pri prijemu kompleksnih zvukova.



Slika 9.12 - Dijagram izofonskih linija (brojevi na linijama značavaju fone)