

Na ovim elektrificiranim prugama uspostavljena je potpuna sigurnost primjenom automatizacije saobraćaja putem daljinskog upravljanja. Upravljanje napajanja elektrificiranih pruga provodi se daljinski i primjenjuje se poluautomatska kontrola maksimalne vožnje i signalizacije u upravljačnicima vozila, iako bi sve moglo biti potpuno automatizirano i bez prisustva strojovode.

Na taj su način željeznice postigle da su konkurentne ne samo autobusnom putničkom prevozu, već čak i avionskom prometu na relacijama do ~ 400 km.

Osim električne vuče u Kanadi se uvođe brzi motorni vlakovi na plinsko-turbinski pogon za brzinu od 225 km/h. Francuzi vrše studije i pripreme za brzine od 235 i čak 300 km/h za prugu Paris—Lyon, a Englezzi za 250 km/h.

Možda će biti ostvarene i brzine vožnje iznad 300 km/h do 400 km/h, ali ne više s klasičnom željeznicom i vučom. U Francuskoj, Engleskoj i Japanu mnogo se radi na studiranju, razvijanju i eksperimentima radi uvođenja tzv. aerovlakova, na principu lebdjelice s raketnim pogonom, na posebnom betonskom trupu, ili primjenom električnog linearnog indukcionog motora (v. *Električni strojevi*).

LIT.: K. Sachs, Elektrische Vollbahnlokomotiven, Berlin 1928. — M. F. Noueion, La technique de l'électrification ferroviaire, 1958. — Č. Čavlin, Električna vuča na željeznicama, Beograd 1960. — И. И. Власов, К. Г. Маркса, Контактная сеть, Москва 1961. — К. Г. Маркса, Энергоснабжение электрических железнодорожных дорог, Москва 1965. V. i literaturu u članku *Električna vuča*.

C. Čavlin

ELEKTROAKUSTIKA je grana elektrotehnike koja se bavi teorijskim i praktičnim problemima pretvorbe zvuka u električne oscilacije i obrnuto. Ona proučava: elektro-akustičke pretvarače (zvučnike, mikrofone itd.), snimanje zvuka i njegovu reprodukciju (fotografskim, magnetskim ili mehanografskim putem), prijenos reproduciranog zvuka većem broju ljudi na otvorenom i u zatvorenim prostorijama (ozvučavanje), akustičku obradu prostorija, metode borbe protiv buke, stvaranje zvuka elektroničkim putem i njegovu primjenu u tehničke svrhe (infrazvuk, ultrazvuk) i drugdje (podvodna akustika, medicina itd.). Pri prijenosu govora i glazbe elektroakustika proučava svu problematiku u vezi s vjernošću prijenosa između originala i reprodukcije. Ona sudjeluje pri rješavanju problema osobā s oštećenim slušom. Konačno treba spomenuti i razvijanje elektroakustičkih mjerneih metoda i provođenje takvih mjerena radi ispitivanja pojedinih elektroakustičkih elemenata, uređaja i njihovog kvaliteta, akustičko mjerjenje prostorija, ispitivanje građevinskog materijala i materijala za akustičku izolaciju.

OSNOVE AKUSTIKE

Akustika, nauka o zvuku, bavi se zvukom i kao fizikalnom pojmom (oscilacijama gustoće materije i/ili položaja materijalnih čestica), i kao stimulusom (podražajem) za osjetni doživljaj sluha, i kao samim tim doživljajem u svijesti čovjeka. Akustika općenito, a tako i elektroakustika, prema tome je interdisciplinska grana nauke: jednim dijelom pripada fizici, a drugima psihologiji i psihofizički, graničnom području između psihologije i fizike (također fiziologije).

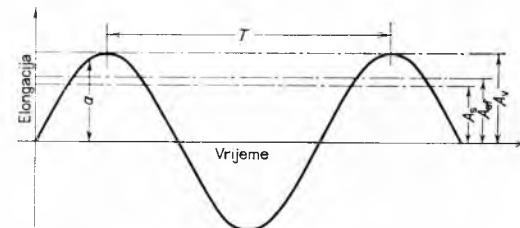
Za razliku od akustike općenito — koja se bavi svim oscilacijama materijalnih čestica, kako onima koje mogu predstavljati podražaj za osjet sluha tako i onima koje to ne mogu — elektroakustika se bavi pretežno čujnim zvukom, jer glavnoj njezinoj primjeni u tehnici krajnji je cilj kvalitetna reprodukcija ljudskog glasa i zvukova muzičkih instrumenata. Zbog toga su za elektroakustiku od podjednake važnosti i *fizikalna ili objektivna akustika*, koja se bavi zvukom kao podražajem za osjet sluha (fizikom proizvodnje, prijenosa i primanja čujnog zvuka), i *psihoakustika ili subjektivna akustika*, koja se bavi kako odnosima između subjektivnog osjeta zvuka i njegovog objektivnog podražaja (psihofizička sluha) tako i doživljajima osjeta sluha bez veze s njegovim podražajem (psihologija sluha). Onaj dio fizikalne akustike koji se bavi fizikom ljudskih organa za proizvodnju i primanje zvuka — govornog organa i uha — pripada i u fiziologiju (*fiziološka akustika*). Zakonitosti svakog od navedena dva dijela akustike specifične su, u njima je riječ o posebnim fizikalnim, psihofizičkim, odn. psihološkim veličinama, koje se mijere različitim jedinicama, kako je to u nastavku prikazano.

Fizikalne osnove akustike

Akustika se i u svom fizikalnom dijelu prvo bitno bavila samo čujnim zvukom (ἀκούω akou ċujem), tj. oscilacijama materijalnih čestica frekvencije između 16 i 20 000 Hz. Danas se ona bavi zvukom u širem smislu, tj. oscilacijama materijalnih čestica bez obzira na njihovu frekvenciju, pri čemu se oscilacije frekvencije niže od 16 Hz nazivaju *infrazvukom*, frekvencije više od 20 000 Hz *ultrazvukom*, a oscilacije vrlo visokih ultrazvučnih frekvencija, u području iznad 10^{10} Hz, i *hiperzvukom*. Zvuk se u prostoru (zvučnom polju) širi u obliku vala. U plinovima i u tekućinama valovi su zvuka isključivo longitudinalni, tj. oni se šire u istom pravcu u kojem se gibaju čestice medija pri titranju (kako je prikazano modelom u sl. 1), u čvrstim tijelima mogu valovi zvuka biti također transverzalni, tj. čestice medija mogu titrati i okomito na pravac širenja vala. Pod zvukom u najužem smislu riječi razumijeva se *zvuk u zraku*, tj. titranje čestica zraka.

Fizikalnim osnovama proizvodnje, širenja i prijema zvuka (u širem smislu riječi), nekim primjenama zvuka (posebno ultrazvuka) u tehnici i arhitektonskom akustikom bavi se u ovoj enciklopediji članak *Akustika* (TE 1, str. 56). Ovdje će se u drugom kontekstu, tj. u vezi prvenstveno s reprodukcijom govora i muzike, iznijeti glavni pojmovi objektivne akustike, te veličine i jedinice kojima se oni mijere.

Zvučni val. Zvuk u zraku predstavlja longitudinalno titranje molekula zraka oko ravnotežnog položaja, uslijed čega dolazi do periodične promjene (oscilacije) tlaka zraka p oko vrijednosti atmosferskog tlaka p_0 . Najjednostavnije titranje koje može izvesti čestica, odn. tlak zraka, jest harmoničko ili sinusoidno titranje, pri kojem se pomak čestice ili odstupanje tlaka zraka u određenoj točki od ravnotežne vrijednosti (*elongacija*) mijenja s vremenom po zakonu sinusa (sl. 2). Promjena položaja čestice ili visine tlaka između dvije vremenske točke u kojima su elongacija i smjer te promjene jednake zove se *titraj*, trenutno stanje unutar titraja zove se *faza titranja*, razmak vremena između dvije uzaštočne jednake faze zove se *period titraja*, T , najveća elongacija unutar perioda zove se *amplituda* (vršna vrijednost veličine koja oscilira), npr. amplituda (vršna vrijednost) zvučnog tlaka p_v .



Sl. 2. Čisti (sinusoidni) ton i njegove karakteristične veličine: T — perioda, a — elongacija, A_s — srednja vrijednost, A_{ef} — efektivna vrijednost, A_v — vršna vrijednost

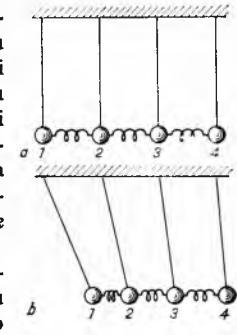
Recipročna vrijednost perioda titraja T , $f = 1/T$, tj. broj titraja u jedinici vremena, zove se *frekvencija titranja*. Mjeri se obično u titrajima na sekundu (hercima, Hz).

Efektivna vrijednost izmjenične veličine, npr. efektivni zvučni tlak p_{ef} , jest njezina kvadratna sredina:

$$p_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}.$$

Pri pravilnim titrajima efektivna vrijednost stoji u određenom omjeru prema vršnoj vrijednosti, tj. amplitudi, npr. za sinusoidno titranje efektivna vrijednost zvučnog tlaka iznosi $\sqrt{0,5} p_v = 0,707 p_v$. *Srednja vrijednost* izmjenične veličine je njezina aritmetička sredina, npr. zvučnog tlaka:

$$p_s = \frac{1}{T} \int_0^T |p| dt.$$



Sl. 1. Model elastično spojenih masa za prikazivanje longitudinalnih valova. a) Stanje mirovanja, b) širenje longitudinalnog vala; 1...4 metalne kuge, između njih opruge

Za sinusoidno titranje je $p_s = 0,637 \text{ p.v.}$. Kad se u akustici govorio o nekoj izmjeničnoj veličini bez bliže oznake, podrazumijeva se po pravilu efektivna vrijednost.

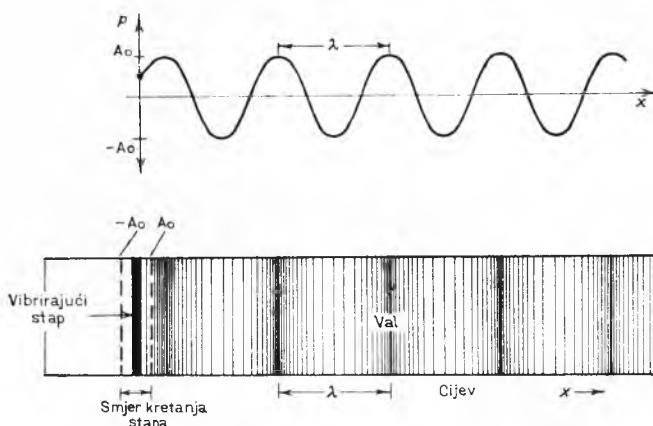
U mediju koji ispunjava prostor, npr. u zraku ili vodi, zvuk se širi zbog elastične veze među njegovim molekulama, nastaje zvučni val. Zvučni val koji se širi radikalno iz jedne točke u svim smjerovima zove se *kuglasti val*. Nastajanje takvog vala u obliku »pulzirajuće kugle« prikazano je na sl. 3.



Sl. 3. Postanak kuglastog vala, a) Pulziranje kugle, b) schematicki prikaz kuglastog vala

stalno u istom radikalnom smjeru, nego -natrag oko ravnotežnog položaja, a dojam stalnog radikalnog gibanja nastaje zbog širenja pojave, slično kao kod krugova na vodi u koju je ubaćen kamen.

Na velikoj udaljenosti od izvora zvuka kuglasti val postaje *ravni zvučni val*, jer je optošje kugle u usporedbi s dimenzijama prijemnika (uhra, mikrofona) ondje praktički ravno. U ravnim



Sl. 4. Ravni val u cijevi

valovima širi se npr. i zvuk izazvan titranjem stapa u cijevi konstantnog presjeka (sl. 4). Najmanja udaljenost između dvije točke iste faze u određenom trenutku vremena zove se duljina vala (valna duljina) λ . Brzina kojom se odredena faza vala pomiče u prostoru zove se *brzina (širenja, rasprostiranja) zvuka, c*. Ona ovisi o prirodi medija u kojemu se zvuk širi. Između valne duljine λ , frekvencije f i brzine zvuka c postoji odnos

$$c = f \lambda. \quad (1)$$

Vrste zvuka. Pravilna periodična oscilacija zvučnog tlaka, kao podražaj za osjet sluha, naziva se i imenom koji psihofizika sluha daje doživljaju što ga takva oscilacija izaziva: *ton*. Harmonična ili sinusoidna oscilacija naziva se *čisti ton*, a periodična neharmonička oscilacija zove se *složeni ton*. Složeni ton se može rastaviti po Fourierovu teoremu u čiste tonove: *osnovni ton* i *harmonike*, kojima su frekvencije uvijek cijelobrojni višekratnici frekvencije osnovnog tona (v. *Akustika*). Grafički prikaz frekven-

cjske raspodjele amplituda titranja zvučnog tlaka zove se *zvučni spektar*. Spektar složenog tona pokazuje raspodjelu amplituda osnovnog tona i harmonika među diskretne frekvencije (višekratnike frekvencijā osnovnog tona), to je linijski spektar (sl. 5 a, b). *Šum* je nepravilno, neperiodičko titranje; u njemu nema diskretnih frekvencija ni stalnih amplituda; njegov spektar nije linijski, nego kontinuiran (sl. 5 c).

Karakteristične veličine objektivne akustike. *Brzina zvuka*. Ako se u vrlo dugoj cijevi konstantnog presjeka A , na jednoj strani zatvorenoj stапom (v. sl. 4), izazove zvučni val time što se stап pomakne brzinom v udesno, taj će val za vrijeme t proći put $x = ct$ (gdje je c brzina zvuka) i proći će kroz prostor volumena $V = A x = A ct$. Za to vrijeme stап se pomaknuo za put $\Delta x = v t$ i smanjio volumen cijevi za $\Delta V = A \Delta x = A v t$. Gustoća zraka u prostoru zahvaćenom valom bila je prije pomaka stapa udesno $\rho_0 = m/V$, gdje je m masa zraka u volumenu V ; nakon pomaka stapa volumen se zahvaćen valom smanjio na $V - \Delta V$, gustoća se zraka, prema tome, povećala na vrijednost

$$\rho = \frac{m}{V - \Delta V} = \frac{\rho_0 A ct}{A t (c - v)} = \rho_0 \frac{c}{c - v}.$$

Razlika gustoća prije i poslije pomaka stapa iznosi, prema tome,

$$\Delta \rho = \rho - \rho_0 = \frac{\rho_0}{(c/v) - 1} = \rho_0 \frac{v}{c - v}. \quad (2)$$

Sila kojom stап tlači na plin jednaka je umnošku njegove površine A i razlike Δp između tlaka plina prije i poslije pomaka stapa: $F = A \Delta p$. Impuls je, prema tome, $F t = m v = \rho_0 A c t \cdot v$, iz čega slijedi

$$\Delta p = \rho_0 v c. \quad (3)$$

Iz te jednadžbe i jedn. (2) dobiva se eliminacijom brzine stapa v :

$$\Delta \rho = \frac{\Delta \rho \cdot \Delta p}{\rho_0 c^2 - \Delta p} = \frac{\Delta p}{c^2 - \Delta p / \rho_0}, \quad (4)$$

ovisnost između promjene gustoće plina, promjene tlaka plina, brzine zvuka i prvobitne gustoće plina ρ_0 pri pomaku stapa udesno.

Tablica 1
FREKVENCIJA f I VALNA DULJINA λ ZVUKA U ZRAKU (20 °C, 1 atm)

f , Hz	16 000	12 000	8000	4000	1000	600	200	50
λ , cm	2,1	2,8	4,3	8,6	34,2	57,1	171,2	686,0

Pri tom pomaku razlika volumne energije $\Delta p \cdot \Delta V$ razvija se u obliku topline. Budući da je takav pomak vrlo brz a toplinska vodljivost mala, stanje se plina mijenja adijabatski, tj. (uz pretpostavku da je zrak idealan plin) vrijedi Poissonova jednadžba $p/\rho^\alpha = \text{konst.} = p_0/\rho_0^\alpha$ i njezina derivacija po gustoći:

$$\frac{dp}{d\rho} = \alpha p_0 \frac{\rho^\alpha - 1}{\rho^{\alpha-1}}, \quad (5)$$

gdje je α omjer između specifičnih toplina plina pri stalnom tlaku i pri stalnom volumenu: $\alpha = c_p/c_v$.

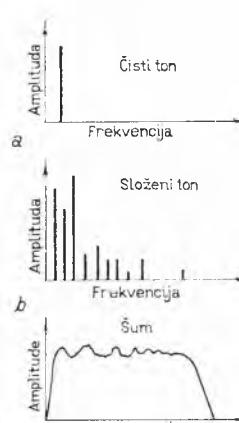
Uzme li se da Δp i $\Delta \rho$ u jedn. (4) teže prema dp i $d\rho$, dobiva se uvrštenjem izraza (5) u tu jednadžbu:

$$\alpha c^2 - dp = \alpha p_0 (\rho/\rho_0)^{\alpha-1}.$$

Ako $dp \rightarrow 0$, onda $\rho \rightarrow \rho_0$, pa se, s jednadžbom stanja za idealne plinove, $p/\rho = RT$ (gdje je R plinska konstanta, a T absolutna temperatura) dobije konačna jednadžba

$$c = \sqrt{\alpha p_0 / \rho_0} = \sqrt{\alpha R T_0}.$$

Brzina zvuka u plinovima ovisi, dakle, o tlaku i gustoći plina, odn. o apso-



Sl. 5. Zvučni spektar: a) čistog tona, b) složenog tona, c) šuma

lutnoj temperaturi, i o omjeru α njegovih specifičnih toplina (za zrak $\alpha = 1,4$). U suhom zraku pod tlakom 1 atm i na temperaturi 20°C brzina zvuka iznosi 343 m/s. Ako se ta vrijednost uvrsti u jedn. (1), dobije se ovisnost između valne duljine i frekvencije zvuka u zraku prikazana u tabl. 1. S porastom nadmorske visine smanjuje se atmosferski tlak p_0 , ali se u istom omjeru smanjuje i gustoća zraka ρ . Zato promjena nadmorske visine neznatno utječe na brzinu zvuka. Naprotiv, brzina zvuka c (m/s) ovisi u velikoj mjeri o temperaturi θ ($^\circ\text{C}$); ona se može približno izračunati s pomoću brojčane formule

$$c \approx 331,4 + 0,6 \theta.$$

Brzina zvuka u tekućinama ovisi o adijabatskoj kompresibilnosti tekućine k i o gustoći mirne tekućine ρ_0 prema jednadžbi

$$c = \sqrt{\frac{1}{k \rho_0}}.$$

Za brzinu zvuka u čvrstim tijelima v. *Akustika*, TE 1, str. 60.

Brzina zvuka u različitim materijalima iznosi, na primjer: u vodiku 1270, vodi 1490, opeci 3650, orahovini 4310, gumi 50, čeliku (u štapovima) 5050 m/s.

Zvučni tlak p je izmjenični tlak koji se prilikom širenja zvučnog vala superponira atmosferskom tlaku. Zvučni je tlak vrlo mali u odnosu prema atmosferskom tlaku: najniži zvučni tlak koji ljudsko uho još može zamjetiti iznosi $2 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2$ ($\approx 2 \cdot 10^{-10} \text{ atm} = 2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar}$), a zvučni tlak koji izaziva bol u uhu iznosi 20 N/m^2 ($\approx 2 \cdot 10^{-4} \text{ atm}$).

Kad se u akustici govori o zvučnom tlaku, podrazumijeva se po pravilu efektivni zvučni tlak (v. str. 298). Trenutni zvučni tlak proporcionalan je elongaciji čestice koja titra, efektivni zvučni tlak, prema tome, efektivnoj vrijednosti pomaka čestice.

Titrajna brzina čestice je brzina v kojom čestica pri titranju prolazi kroz određeni položaj (elongaciju). Pri sinusoidnom titranju ona iznosi

$$v = 2\pi f a = \omega a, \quad (6)$$

gdje je $\omega = 2\pi f$ kružna frekvencija, a $a = A_v \sin \omega t$ je elongacija. (A_v je amplituda.) Titrajna je brzina čestica vrlo mala: u zraku pri zvučnom tlaku 20 N/m^2 njezina je maksimalna vrijednost svega $0,05 \text{ m/s}$.

Titrajna brzina čestice rijetko se upotrebljava u akustičkim proračunima. Od veličina zvučnog polja u akustici se praktički mjeri samo zvučni tlak, zato što je to mjerjenje jednostavno i zato što uho prima zvuk kao promjenu tlaka. Kako slijedi iz jedn. (3), odnos između titrajne brzine, zvučnog tlaka, gustoće plina i brzine zvuka izražen je jednadžbom

$$v = \frac{p}{\rho_0 c}.$$

Prema elektromehaničkoj analogiji između širenja ravnog zvučnog vala i širenja električnog vala duž beskonačno dugog homogenog voda, brzini čestica v odgovara jakost struje I , a tlaku p napon U . Umnožak $\rho_0 c$, koji odgovara valnom otporu Z_c , naziva se stoga i u akustici valnim otporom, a zove se također *karakteristična akustička impedancija* zvučnog medija, Z_c . Ona iznosi npr. za zrak na 18°C i pod 1 atm 415 Ns/m^3 , a za vodu na 18°C i pod 1 atm $1,4 \cdot 10^7 \text{ Ns/m}^3$.

Jakost zvuka (intenzitet zvuka) I količina je akustičke energije koja u jedinici vremena prostruji kroz jediničnu površinu plohe postavljene okomito na smjer širenja zvuka. Danas se govoreći o jakosti zvuka redovito podrazumijeva efektivna jakost zvuka I_{ef} :

$$I_{ef} = p_{ef} v_{ef} = p_{ef}^2 / \rho_0 c = p_{ef}^2 / Z_c. \quad (7)$$

Stoga će se u nastavku ovog članka oznakom I (bez indeksa) označavati efektivna vrijednost jakosti zvuka.

Akustička snaga P je umnožak jakosti zvuka i površine kroz koju zvuk prostruji:

$$P = A I = A p v = \frac{A p^2}{\rho_0 c}.$$

Akustička snaga zvuka u zraku u vatima može se izračunati s pomoću brojčane jednadžbe $P = A p^2 / 415$, u koju se uvrštava A

u m^2 , a p u N/m^2 . Akustička snaga nekih izvora zvuka dana je u tabl. 2.

Prostorno područje u kojem su svakoj točki pridružene određene vrijednosti zvučnog tlaka i titrajne brzine čestice zove se zvučno polje. Zvučno polje neposredno uz izvor zvuka naziva se blisko zvučno polje. U njemu titrajna brzina i jakost zvuka nisu u fazi, a akustička snaga nije razmjerna kvadratu zvučnog tlaka. Daleko zvučno polje je polje dovoljno daleko od izvora zvuka; u njemu su titrajna brzina i jakost zvuka u fazi, a akustička je snaga razmjerna kvadratu zvučnog tlaka. Ako u zvučnom polju dolazi do dovoljnog broja refleksija, može nastati difuzno zvučno polje. U njemu je gustoća zvučne energije jednolik raspodijeljena, a tok zvučne energije je jednak u svim smjerovima.

Tablica 2
AKUSTIČKA SNAGA RAZLIČNIH IZVORA ZVUKA

Izvor zvuka	Akustička snaga P , W
Normalan govor	$7 \cdot 10^{-4}$
Vršna snaga govora	$2 \cdot 10^{-3}$
Violina, fortissimo	$1 \cdot 10^{-4}$
Klavir, fortissimo	$2 \cdot 10^{-1}$
Truba, fortissimo	$3 \cdot 10^{-1}$
Pneumatski čekić	1
Orgulje, fortissimo	10
Veliki orkestar (75 članova), maximum	70
Veliki zvučnik	100
Mlazni avion	10^4

Akustička impedancija i elektroakustička analogija. Analogija je fizikalna srodnost među pojавama izražena time što su analogne pojave matematički prikazane formalno identičnim jednadžbama. Takve analogije postoje među pojavama u različnim titravnim sistemima kojima se bavi elektroakustika: mehaničkim, električnim i akustičkim. U članku *Analogno računalo* ove enciklopedije (TE 1, str 296) uvodno su izložene dvije analogije među mehaničkim i električnim oscilatornim sistemima, u kojima su među sobom analognе veličine navedene u prvom i drugom stupcu tabl. 3. U članku *Akustika* ove enciklopedije analogija između mehaničkog titravnog sistema i električnog titravnog kruga upotrijebljena je za matematičku obradu mehaničkog oscilatora (TE 1, str. 58), a pri izračunavanju rezonantne frekvencije Helmholtzova rezonatora (TE 1, str. 65) upotrijebljena je analogija između akustičkog i mehaničkog titravnog sistema.

Tablica 3
ANALOGIJA MEĐU MEHANIČKIM, ELEKTRIČNIM I AKUSTIČKIM VELIČINAMA

Mehaničke veličine	Električne veličine	Akustičke veličine
Sila Brzina Pomak Masa	Napon Struja Naboј Induktivitet	Zvučni tlak Protok Volumenski pomak Akustička masa (Akustički induktivitet) Akustički kapacitet (Akustička elastičnost) Akustički otpor
Elastičnost	Kapacitet	
Otpor trenja	Otpor	

Gore spomenuta elektromehanička analogija sa stanovišta akustike nije potpuna utoliko što kod električnog voda umnožak $U I$ daje snagu, a kod zvučnog je vala analogni umnožak $p v$ jakost zvuka I , a tek umnožak jakosti zvuka s površinom je akustička snaga. Taj se nedostatak u *elektroakustičkoj analogiji* uklanja time što se kao veličina analogna jakosti struje, umjesto brzine čestica, uvede njoj proporcionalni *protok* (fluida) q (volumna struja). To je, pri prostiranju ravnog zvučnog vala kroz zrak u cijevi stalne površine presjeka A , volumen zraka koji u jedinici vremena prođe kroz taj presjek:

$$q = \frac{dV}{dt} = A \frac{dx}{dt} = A v = \frac{A}{\rho_0 c} p.$$

Veličina

$$Z = \frac{\rho_0 c}{A} = \frac{p}{A v} = \frac{p}{q} \quad (8)$$

analognog kvocijentu napona i struje, tj. impedanciji, naziva se *akustičkom impedancijom*, Z_a . Ona se, kao i električna impedancija, sastoji od realnog i od imaginarnog dijela.

Kratak električni vod — znatno kraći od valne duljine — kojemu se na kraju nalazi impedancija Z_k ima u dva ekstremna slučaja

— kad je u praznom hodu i kad je na kraju u kratkom spoju — ove ulazne impedancije:

$$Z_{x\infty} = \frac{Z_c}{j k x} \quad \text{i} \quad Z_{x0} = j Z_c k x,$$

gdje je Z_c valni otpor, x udaljenost od kraja voda a k konstanta. U akustici je kratkom vodu analogna kratka cijev, i to vodu u praznom hodu analognog je zatvorena cijev, a vodu u kratkom spoju (dovoljno približno) otvorena cijev. Prema tome je akustička »kapacitivna« impedancija kratke zatvorene cijevi

$$Z_{x\infty} = \frac{\rho_0 c}{j k x A} = \frac{\rho_0 c^2}{j \omega x A}, \quad (9)$$

a akustička »induktivna« impedancija otvorene cijevi

$$Z_{x0} = j \frac{\rho_0 c k x}{A} = j \frac{\rho_0 c^2}{A}. \quad (10)$$

Iz jedn. (9) i (10) dobivaju se izrazi za *akustički kapacitet* C_a i *akustički induktivitet* m_a , koji odgovaraju kapacitetu i induktivitetu u elektrotehnici. To su, uzimajući dužinu cijevi l umjesto x :

$$C_a = \frac{A l}{\rho_0 c^2} = \frac{V}{\rho_0 c^2} \quad \text{i} \quad m_a = \rho_0 \frac{l}{A}. \quad (11)$$

Na ulazu u zatvorenu cijev postoji protok q uvijek kad postoji i zvučni tlak p . To je posljedica elastičnosti medija. Što je elastičnost veća (a veća je i što je volumen veći), to je protok veći i, prema jedn. (8), manja je impedancija, tj. veći je kapacet. Stoga se akustički kapacet C_a zove i *akustička elastičnost*.

Akustički je induktivitet, prema jedn. (11), to veći što je gustoća ρ_0 veća, dakle što je veća masa fluida (uz iste l i A). Stoga se akustički induktivitet naziva i *akustičkom masom* i označuje sa m_a . Akustički je induktivitet to veći i što je cijev dulja, ali samo pod uvjetom da je cijev znatno kraća od valne dužine, tj. da ne dođe do strujanja medija u cijevi.

Akustički otpor R_a odgovara električnom otporu. On je zane-marljivo mali za cijevi polumjera većeg od 0,1 cm, jer opada s četvrtom potencijom polumjera prema jednadžbi

$$R_a = \frac{8 \eta l}{r^4},$$

u kojoj je η dinamički viskozitet medija (za zrak $1,86 \cdot 10^{-4}$ P) a r polumjer cijevi. Iz istog razloga akustički otpor vrlo je velik za cijevi vrlo malog promjera. Zato su tvari s uskim porama, npr. tekstilni materijali, dobri apsorberi zvuka.

Za titrajni sistem kao što je, npr., Helmholtzov rezonator (sl. 6, v. i *Akustika*, TE 1, str. 65) vrijedi jednadžba

$$m_a \ddot{V} + R_a \dot{V} + \frac{1}{C_a} V = p,$$

gdje je \ddot{V} ubrzanje, \dot{V} protok, a ostala slova imaju ista značenja kao dosad. Us-poredi li se ta jednadžba s formalno identičnim jednadžbama za mehanički i električni titrajni sistem:

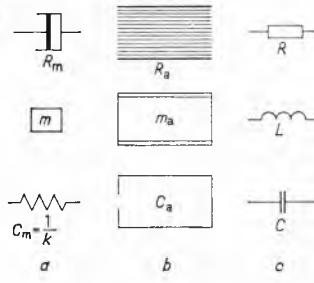
$$m \ddot{y} + R_m \dot{y} + \frac{1}{C_m} y = F,$$

$$L \ddot{q} + R \dot{q} + \frac{1}{C} q = U,$$



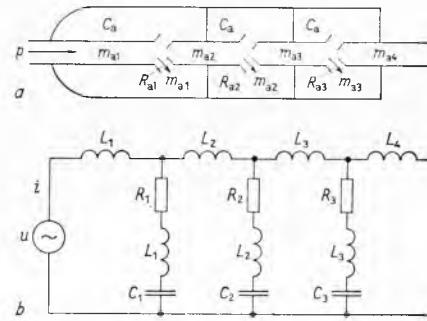
Sl. 6. Helmholtzov rezonator

u kojima m znači masu, R_m otpor trenja, C_m elastičnost, F silu, y pomak, L induktivitet, R otpor, C kapacitet, U napon, q naboј, vidi se da je zaista akustička masa (akustički induktivitet) analogna masi i induktivitetu, akustički otpor otporu trenja i električnom otporu, akustički kapacitet (elastičnost) elastičnosti i električnom kapacitetu, zvučni tlak sili i naponu, volumenski pomak linearnom pomaku i električnom naboјu. U tabl. 3 skupljene su osnovne veličine koje jedna drugoj odgovaraju prema analogijama između mehaničkih, električnih i akustičkih veličina. Na sl. 7 prikazani su simboli triju osnovnih elemenata koji su u aku-



Sl. 7. Simboli triju osnovnih veličina u mehaničkim (a), akustičkim (b) i električnim sistemima (c)

sistici i mehanički analogni otporniku otpora R , zavojnici induktiviteta L i kondenzatoru kapaciteta C . Na sl. 8 data je električna nadomjesna shema automobilskog prigušivača, koji se sastoji od niza akustičkih rezonatora. Nepoželjna akustička energija pretvara se zbog trenja čestica u toplinu u grlima rezonatora, koji predstavljaju akustičke »otpornike« otpora R_{a1} , R_{a2} , R_{a3} . Takvo svestređenje čisto akustičkih, elektroakustičkih i mehanoakustičkih sistema na električne titrajne krugove znatno olakšava rješavanje problema u tehničkoj akustici, jer su električni titrajni krugovi tako dobro razrađeni da njihovo rješavanje ni u razmjeru zamršenim slučajevima ne stvara načelnih teškoća.



Sl. 8. Električna nadomjesna shema automobilskog prigušivača. a) Shematski prikaz prigušivača, b) električna nadomjesna shema po elektroakustičkoj analogiji

Jedinice veličina objektivne akustike. Objektivna akustika dio je mehanike, njezine se stoga veličine mijere jedinicama mehanike, obično jedinicama sistema SI (MKS) ili CGS. Tako se tlak izražava u N/m^2 ili dyn/cm^2 , pri čemu se ova posljednja jedinica obično naziva *mikrobar*, μ bar ($1 \text{ bar} = 10^4 \text{ N/m}^2 = 10^6 \text{ dyn/cm}^2$, $1 \mu\text{bar} = 10^{-6} \text{ N/m}^2 = 1 \text{ dyn/cm}^2$). Frekvencija se mjeri u $s^{-1} = \text{Hz}$, duljina vala u m ili cm , brzina zvuka u m/s , gustoća u $\text{kg/m}^3 = \text{g}/\text{dm}^3$, akustička impedancija prema jedn. (4b) u Ns/m^2 , valni otpor $\rho_0 c$ u Ns/m^3 , jakost zvuka u W/m^2 ili erg/s cm^2 , akustička snaga u W ili erg/s . Jedinica akustičke impedancije i akustičkog otpora, Ns/m^3 , naziva se, po analogiji, također *akustički om*, a kao jedinica valnog otpora upotrebljava se i *rejl* (rayl, po engleskom fizičaru Rayleighu). $1 \text{ rejl} = 10 \text{ Ns/m}^3$.

Razina zvučnog tlaka i jakosti zvuka. Omjer između dvije vrijednosti zvučnog tlaka ili jakosti zvuka izražava se obično logaritamski, u decibelima (v. *Električna mjerenja*, TE 3, str. 635).

Dekadski logaritam omjera izražen u belima, odn. decibelima, najprije je i upotrebljen u akustici. Taj je način izražavanja relativnih vrijednosti zvučnog tlaka i jakosti zvuka u tom slučaju vrlo prikladan ne samo zbog velikog raspona nu neričkih vrijednosti tih veličina između praga čujnosti i granice bola (omjer je tih graničnih vrijednosti za zvučni tlak $1 : 10^4$, a za jakost zvuka $1 : 10^{12}$), nego donekle i zbog logaritamske karakteristike mehanizma primanja zvuka (v. str. 306).

Razina zvučnog tlaka L_p je logaritam omjera između mjerene vrijednosti zvučnog tlaka i referentnog tlaka $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2 (2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar})$, tj. zvučnog tlaka na pragu čujnosti na frekvenciji 1000 Hz. Ona iznosi

$$L_p = 20 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right) \text{ dB.}$$

Razina jakosti zvuka L također se izražava u odnosu prema njezinoj vrijednosti na pragu čujnosti pri frekvenciji 1000 Hz, $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$, te iznosi u decibelima

$$L = 10 \lg \left(\frac{I}{I_0} \right) \text{ dB.}$$

Dinamika. Važan je faktor kvaliteta pri reprodukciji zvuka odnos između najglasnijeg i najtišeg zvuka u reprodukciji. Objektivna mjeru za taj odnos predstavlja *dinamika*, koja je omjer između najveće jakosti zvuka I_{\max} i najmanje jakosti I_{\min} , izražen redovito logaritmički:

$$\text{Dinamika} = 10 \lg \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \text{ dB} = 20 \lg \frac{p_{\max}}{p_{\min}} \text{ dB.}$$

Dinamika je govor prosjечно 40 dB, a iznimno može doći 56 dB, dinamika plesne muzike u prosjeku je od 20 do 30 dB, a simfonijskog orkestra između 65 i 74 dB. Dinamika radio-prijenosu iznosi svega ~40 dB jer se dinamika elektroakustičkih uređaja mora ograničavati zbog izobličenja pri velikim glasnoćama, a ograničenja je smetnja (brujanjem, sumom) pri malim glasnoćama.

Frekvencija i objektivna visina tona. Visina je subjektivna karakteristika tona kao doživljaja osjeta sluha. Doživljeni je ton to viši što je viša frekvencija titranja koje je doživljaj izazvalo, tj. tona kao objektivnog podražaja. Zbog toga se visina tona postotvelita s frekvencijom tona-podražaja i ona se ocjenjuje muzičkom ljestvicom, koja se definira omjerima između osnovnih frekvencija susjednih tonova ljestvice.

Muzička ljestvica visine tona nastala je na osnovi psihoakustičkog osjećaja sklađa, harmonije. Sazvuke dvaju ili više tonova čovječki osjećaju kao skladnije što su manjim cijelim brojevima izraženi omjeri njihovih frekvencija (*frekvencijski omjeri, muzički intervali, relativne visine tona*). Od sazvuk dva tonova kao najskladniji se stoga osjeća sazvuk s omjerom frekvencija 1 : 2, on se osjeća upravo kao sazvuk jednog tona s istim tonom na drugoj visini. Interval između dva takvih tona zove se *oktava*. Drugi intervali koji daju skladne sazvuke (konsonance) jesu intervali zvani kvinta (2 : 3) i kvarta (3 : 4), pa terca (4 : 5) i seksta (3 : 5). Kao najskladniji sazvuk od tri tona (trozvuk, akord) osjeća se onaj čije frekvencije stoje u omjeru 4 : 5 : 6 (njemu je sadržana terca, 4 : 5, i kvinta, 2 : 3 = 4 : 6).

(Sazvuci se osjećaju jednakno na svim tonskim visinama jer se svaki interval na svim tonskim visinama osjeća kao jednaka razlika visine tona.)

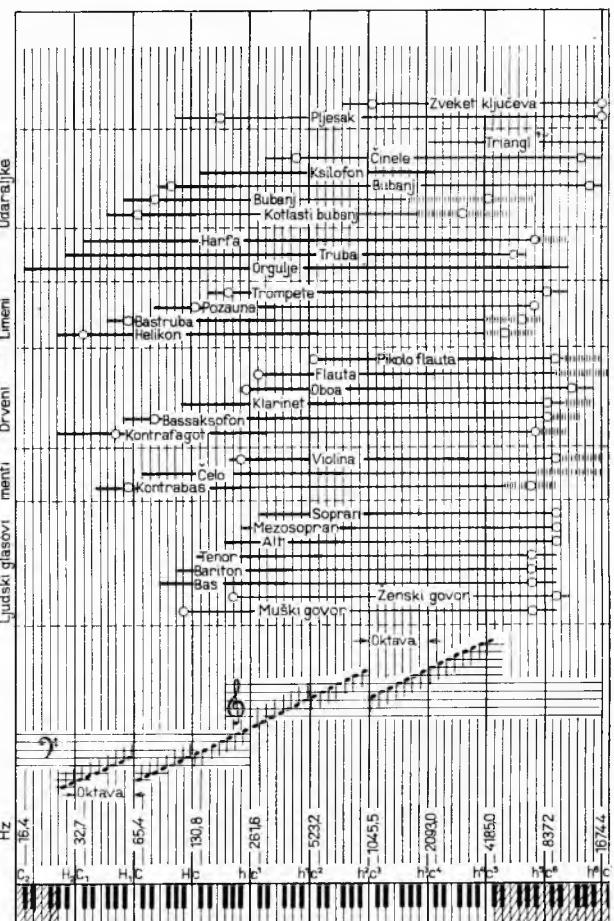
Ljestvica (visina tona) u kojoj je interval oktave razdjeljen s pomoću 7 tonova na 7 podintervala zove se *dijatonska ljestvica*. Dijatonska dur-ljestvica sadrži 7 tonova (nota) takvih frekvencija da se njima mogu izvesti tri uzastopna trozvuka s omjerom frekvencija 4 : 5 : 6. (Uzastopni su trozvuci takvi da najviši ton jednog trozvuka predstavlja najniži ton narednog.) Takva tri trozvuka mogu tvoriti tonovi s ovim omjerima frekvencija:

$$\begin{aligned} & \frac{4}{3} : \frac{5}{3} : \frac{6}{3} \left(= \frac{2}{1} \right), \\ & \left(\frac{1}{1} = \right) \frac{4}{4} : \frac{5}{4} : \frac{6}{4} \left(= \frac{3}{2} \right), \\ & \left(\frac{3}{2} = \right) 4 : \frac{3}{8} : 5 : \frac{3}{8} \left(= \frac{15}{8} \right) : 6 : \frac{3}{8} \left(= 2 : \frac{9}{8} \right). \end{aligned}$$

[Najviši tonovi u prvom i trećem trozvuku, $\frac{2}{1}$ i $\frac{18}{8}$, nalaze se u narednoj višoj oktavi; njima odgovaraju u promatranoj oktavi tonovi s omjerima $\frac{1}{1}$ i $\frac{9}{8}$.] Intervali između tonova s omjerom $\frac{9}{8}$ i $\frac{15}{8}$ u odnosu prema tonu s omjerom $\frac{1}{1}$ (primi) zovu se sekunda, odn. septima. Ostali intervali, terca, kvarta, kvinta, seksta i oktava već su prije spomenuti. Ti su odnosi prikazani u drugom retku tabl. 4. Tonovi u oktavi navedene ljestvice označuju se slovima *c, d, e, f, g, a, h*, s time da se tonovi razlikuju oktavu ili malim slovinom, bez indeksa ili s različitim indeksima, npr. ovako (od nižih tonova navise): ... *C₁*, *C₁*, *C₂*, *C₂*, ... (v. i sl. 9). Apsolutna je visina tonova određena time što je Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO) ton *a⁴* odredila frekvenciju 440 Hz. Time ostali tonovi oktave dur-ljestvice u kojoj je taj ton dobivaju frekvencije navedene u trećem retku tabl. 4.

Dijatonska se ljestvica imenuje prema prvom tonu u drugom trozvuku od ona tri s pomoću kojih je izgrađena. Ljestvica koju smo upravo izgradili s pomoću uzastopnih trozvuka *f, a, c, e, g, h* zove se, prema tome, *c-dur-ljestvica*. Ta se ljestvica naziva još i *čista c-dur-ljestvica* jer su svi intervali (sekunda, terca, ... oktava) u njoj čisti, tj. omjeri su malih cijelih brojeva.

Intervali između susjednih tonova u čistoj *c-dur-ljestvici* nisu svadje isti, kako se vidi u četvrtom redu tabl. 4. Intervali 9/8 i 10/9 zovu se u muzici cijeli stupnjevi (tonovi), a intervali 16/15 polustupnjevi (polotonovi). Polustupnjevi između 3. i 4., te iz 7. tona karakteriziraju *dur-ljestvicu*; *mol-ljestvica* je dijatonska ljestvica sa polustupnjevima između 2. i 3. te 5. i 6. tona.



Sl. 9. Frekvencijsko područje tonova različitih instrumenata i ljudskog glasa

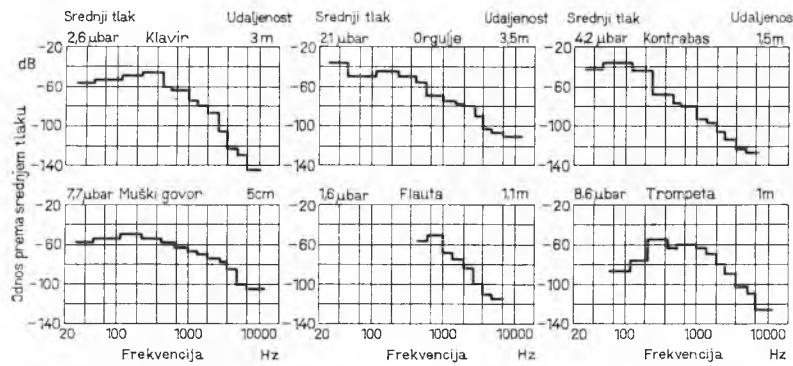
Ljestvice se mogu načiniti na svim tonovima. Da se napišu npr. druge dur-ljestvice, treba samo početi s bilo kojim tonom i postupati (nižući trozvuki) onako kako je učinjeno za *c-dur-ljestvicu*. Građeci tako, npr., čistu *c-dur-ljestvicu*, trebalo bi, da bi se mogli održati omjeri frekvencija, uvesti još četiri nova tona, a za ostale ljestvice bili bi potrebni još dalji novi tonovi. To bi činilo nepremostive teškoće pri konstrukciji muzičkih instrumenata, kao što je klavir. Zato je uvedena *temperirana ljestvica*, tj. ljestvica u kojoj su svi intervali jednak. U svaki interval cijelog stupnja *c-dur* ljestvice umetnut je po jedan ton, pa je dobiven niz od ukupno dvanaest tonova: *c, cis, d, dis, e, f, fis, g, gis, a, ais, h*. Cijela oktava je podijeljena tim tonovima u dvanaest jednakih podintervala, u kojima se

dvije susjedne frekvencije odnose kao $1 : \sqrt[12]{2} = 1 : 1.05946$. Tako je dobivena *kromatska ljestvica*, u kojoj se redaju tonovi u jednakim intervalima od pola stupnja. S tonovima te ljestvice mogu se sastaviti sve temperirane dur- i mol-ljestvice. Frekvencije tonova temperirane *c-dur-ljestvice* navedene su u petom redu tabl. 4 (v. i sl. 9). Intervali temperiranih ljestvica, osim oktave, nisu čisti, ali su odstupanja tih intervala od čistih intervala tako mala da su i za školovanje uho praktički nezamjetljiva.

Slijed oktava temperirane *dur-ljestvice* predstavlja logaritamsku skalu frekvencija (jer svaki ton ima frekvenciju dvostruko veću od frekvencije tona za oktavu dubljega). Bezdimenzijska jedinica *oktava* te skale definirana je, prema tome, analogno jedinicama bel, ali pomoću logaritma s bazom 2. Interval Δ između

Tablica 4
MUZIČKA LJESTVICA VISINE TONA

Oznake tonova	<i>c¹</i>	<i>d¹</i>	<i>e¹</i>	<i>f¹</i>	<i>g¹</i>	<i>a¹</i>	<i>h¹</i>	<i>c²</i>
Čista <i>c-dur-ljestvica</i> , omjer frekvencija	1/1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2/1
Ime intervala u odnosu prema tonu <i>c</i>	prima	sekunda	terca	kvarta	kvinta	seksta	septima	oktava
Čista <i>c-dur-ljestvica</i> , frekvencije, Hz	264	297	330	352	396	440	495	528
Čista <i>c-dur-ljestvica</i> , intervali		9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15
Kromatska <i>c-dur-ljestvica</i> , frekvencije, Hz	261,6	293,7	329,6	349,2	392,0	440,0	493,9	523,2



Sl. 10. Raspodjela relativnog zvučnog tlaka na pojedinim frekvencijama za neke muzičke instrumente

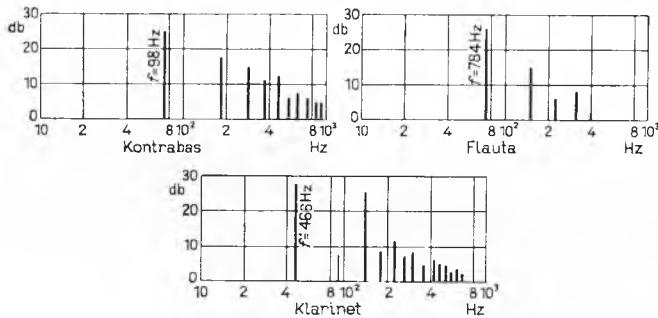
frekvencije f i f_0 izražen u oktavama iznosi

$$\Delta = \log_2 \left(\frac{f}{f_0} \right) = 3,3219 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right).$$

Poloton temperirane dur-ljestvice iznosi $1/12$ oktave, stotinka polotonja, tj. $1/1200$ oktave, nazvana je *cent*. Upotrebljava se i tisućinka oktave, *milioktava*.

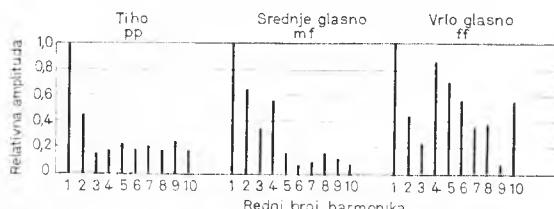
Frekvencijsko područje govora i tonova pojedinih muzičkih instrumenata prikazano je na sl. 9. Svaki se muzički ton sastoji od osnovnog ton-a određene frekvencije (opseg frekvencija osnovnih tonova prikazan je na slici debelom crtom), od harmoničkih tonova (harmonika), koji su mnogokratnici osnovne frekvencije (nijihov opseg je na slici prikazan tankom crtom) i od šumova (na slici vertikalne crticice). U frekvencijskom području instrumenata tonovi različitih frekvencija nisu jednake jakosti. Frekvencijsku raspodjelu relativnih vršnih vrijednosti zvučnog tlaka za pet različitih instrumenata i za ljudski glas prikazuje sl. 10.

Boja tona naziva se u psihokustici karakteristika doživljaja muzičkog zvuka po kojoj se mogu razlikovati tonovi iste glasnoće i iste visine proizvedeni različitim instrumentima. Boja tona određena je brojem, frekvencijom i relativnom jakošću harmonikâ osnovnog tona. Ona, dakle, ovisi o harmoničkom sadržaju zvuka.



Sl. 11. Spektri tonova triju instrumenata

i tranzijentnim pojavama, a donekle i o faznom odnosu između pojedinih komponenata. Prema tome, boji tona u objektivnoj akustici odgovara spektar složenog tona. Sl. 11 prikazuje spekture po jednog tona triju instrumenata. Uspoređenje spektara istog klavirskog tona različite jakosti (sl. 12) pokazuje da se smanjenjem jakosti tona pojednostavljuje njegov spektar.



Sl. 12. Ovisnost spektra klavirskog tona o jakosti

Prelazne pojave. Na navedene karakteristike zvuka — visinu, boju i glasnoću (odn. frekvenciju, spektar i jakost) — utječu prelazne pojave (tranzijenti) pri nastajanju i prekidu tona. One

uzrokuju kolebanje visine, boje i dinamike zvuka u manjim odsjećima vremena. Tako, npr., zbog odjeka (uslijed refleksije zvučnih valova) produžuje se trajanje zvuka i pošto je izvor prestao da ga proizvodi, te taj produženi zvuk djeluje na tonove koji slijede iza njega. Trajanje prelazne pojave Δt , koje sadrži vrijeme nastajanja i vrijeme prekida tona, uzrokuje i proširenje frekvencijskog područja prema Küpfmüllerovoj formuli $\Delta f = 2/\Delta t$.

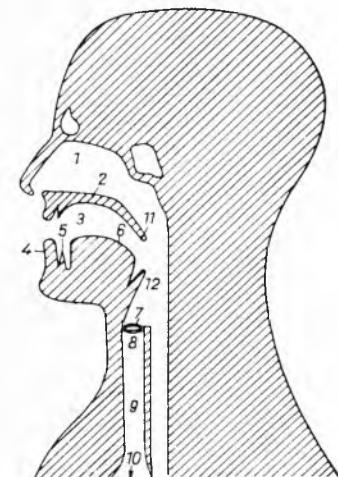
Ako se npr. tonovima iste visine koji su proizvedeni različitim instrumentima (flauta, oboja, truba) odstrane tranzijenti, tj. prelazne pojave pri nastajanju i nestajanju tona (dозвук i одјек), ti se tonovi praktički neće razlikovati, jer je razlika u njihovom spektralnom sastavu uvelike uzrokovana tranzijentima.

Karakteristike zvuka ovise i o usmјernoj (di rektivnoj) karakteristici izvora zvuka (v. *Akustika*, TE 1, str. 61 i u ovom članku str. 314).

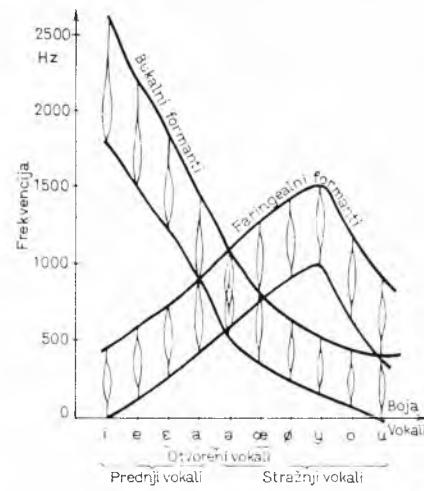
Osnove fiziološke akustike

Fiziološka akustika bavi se fizikom slušnih i govornih organa, nastojeći pri tom naći i uzročne veze između slušnog osjeta, rada tih organa i pojava u vanjskom akustičkom polju.

Sl. 13. Čovjekov govorni organ. I Nasna šupljina, 2 nepce, 3 usna šupljina, 4 usne, 5 zubi, 6 jezik, 7 glasnice, 8 grkljan, 9 dušnik, 10 pluća, 11 resica, 12 ždrijelo

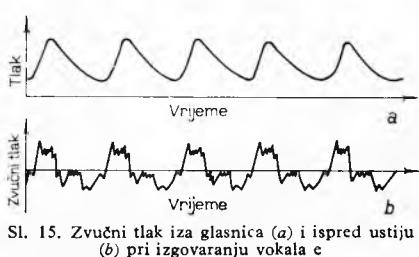


Sl. 13. Čovjekov govorni organ. I Nosna šupljina, 2 nepce, 3 usna šupljina, 4 usne, 5 zubi, 6 jezik, 7 glasnice, 8 grkljan, 9 dušnik, 10 pluća, II resica, 12 ždrilo

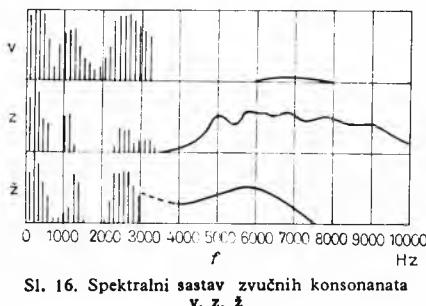


Sl. 14. Zone formanata vokala. Vokali na osi apscisâ navedeni su međunarodnim fonetskim znacima: e je zatvoreno, ε otvoreno e, œ je otvoreno, ø zatvoreno njemačko ö, y = njemačko ü, ɔ je mukli poluglas.

nim dvjema zonama formanata mogu se prikazati spektri svih vokala (sl. 14). Na sl. 15 prikazana je vremenska promjena zvučnog tlaka u grlu iza glasnica i ispred usta pri izgovaranju



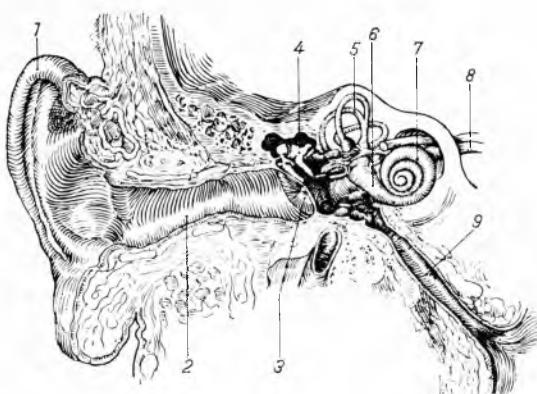
(pjevanju) vokala e. Vokali su složeni tonovi, konsonanti, npr. su šumovi, koji se proizvode s pomoću usana i jezika na različitim mjestima (na Zubima, iznad zubi, na nepcu, u grlu), uz istovremene vibracije govornog aparata izazvane titranjem glasnica (zvučni konsonanti) ili bez tih vibracija (bezvručni konsonanti). Sl. 16 prikazuje spektar triju zvučnih konsonanata v, z i ž.



Navedena nova teorija o aktivnom sudjelovanju glasnica pri proizvodnji zvuka nije danas općenito prihvaćena, pa se grkljan s glasnicama još uvek najčešće uspoređuje sa sviralom, tj. pretpostavlja se da glasnice pasivno titraju pod djelovanjem struje zraka koja kroz njih prolazi. Tek 1950 dokazano je (R. Husson) da glasnice titraju i neovisno o struci zraka, te da bi bilo pravilnije usporediti govorni organ sa sirenom.

Uho je organ sluha (i statičkih osjeta).

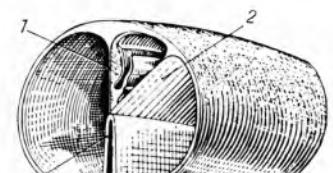
Dijeli se na vanjsko, srednje i unutrašnje uho (sl. 17). Vanjsko uho tvori *ušna školjka* i vanjski slušni kanal ili *zvukovod*, srednje uho tvori šupljina koja je od vanjskog uha odijeljena opnom — *bubnjićem* i u kojoj se nalazi sistem *slušnih koštica*: čekić, nakovanj i stremen, obješeni na svezama (*ligamentima*) i spojeni zglobovima koji su u odraslog čovjeka uvelike oštešeni i nepomični.



Srednje uho je spojeno sa ždrijelom s pomoću Eustahijeve trube, kanala kroz koji se može izjednačiti tlak zraka s obje strane bubnjića. Unutrašnje uho (ili labirint) sastavljeno je od koštanih dijela, koji obrazuju dosta zamršen suvisao sistem šupljina i kanala, i od membranoznog dijela, koji tvori suvisao i prema vani potpuno zatvoren sistem mijehurića i cijevi uložen u šupljine i kanale koštanih sistema. *Koštani sistem* sastoji se od predvorja, pužnice, koja sadrži $2\frac{1}{2}$ zavoja spiralnog kanala, i tri polukružna kanala smještena u među sobom okomitim ravninama. *Membranozni sistem* (sl. 18) tvore torbice i vrećice, uložene u predvorje; tri polukružne cijevi, spojene s torbicom kao da su njezine ručke i uložene u polukružne kanale, i spiralno zavijena cijev uložena u pužnicu. Na membranoznu

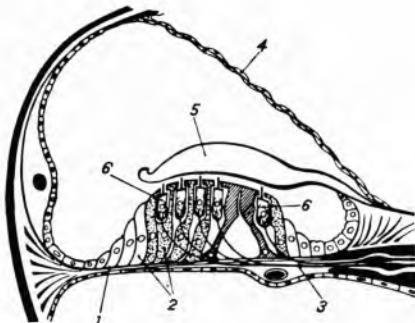
torbicu i vrećicu se nastavlja još jedna cijev koja, prolazeći kroz kanal u kosti završava u izduženoj (tzv. endolimfatskoj) vrećici izvan koštanih dijela unutrašnjeg uha i služi (među ostalim) za izravnanje tlaka tekućine (*endolimfe*) koja ispunjava membranozni labirint.

S historijskog (filogenetskog) stanovišta labirint je jedinstven organ. Prvobitno on je služio samo percepciji mehaničkih potresa i održavanju ravnoteže, u kasnijem razvoju funkcija mu se podjelila, te je postao sposoban da prima zvučne valove i posreduje u postanku novog osjeta, osjeta sluha. Način primanja podražaja je jedinstven: oba se osjeta primaju s pomoću *sticala*. Zbog toga nije lako razgraničiti funkcije tog dijela slušnog organa. Danas se smatra da primanjem zvuka služi prvenstveno organ u pužnici, a primanjem statičkih osjeta (održavanju ravnoteže) torbice sa svoje tri "ručke", mada nesumnjivo vrećica sudjeluje pri primanju objaju osjeta, a prema nekim se autorima npr. šumovi primaju torbicom, a polukružne cijevi sudjeluju pri određivanju smjera iz kojeg dolazi zvuk.



membrane priraštenе (rubom nasuprot priraslom zidu) na spiralnu koštanu ploču koja šupljinu koštanih spiralnih kanala po njegovoj duljini nepotpuno dijeli na dva hodnika. Membranozna spiralna cijev upotpunjuje tu podjelu (sl. 19). Ona od njezine dvije membrane kojih se površina nastavlja na površinu koštane ploče zove se bazalna ili bazilarna membrana; druga se naziva vestibularna membrana.

Bazilarna membrana, zajedno s vrlo komplikiranim spiralnim *Cortijevim organom*, koji s unutrašnje strane na njoj leži, predstavlja organ sluha u najužem smislu. Sastoji se (prema većini autora) od 24 000 poprečnih tetiva, koje su u donjem zavodu kraće (0,04 mm) a prema vrhu postaju sve dulje (do 0,5 mm).

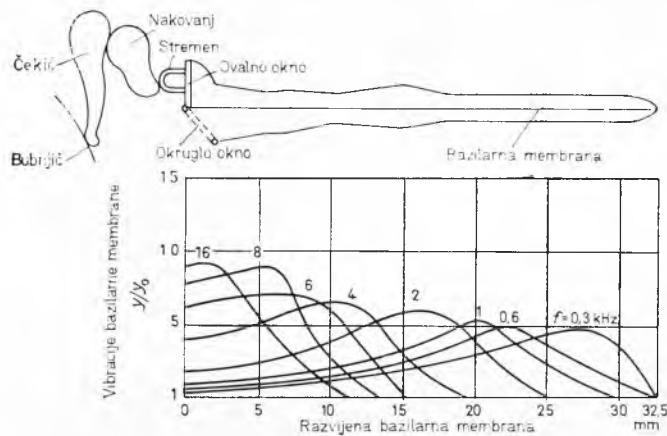


Premda unutrašnjosti spiralne cijevi na površini bazilarne membrane nastavljaju se stanice koje podupiru i nose osjetne stanice, a iznad njih obrazuju mrežastu ploču. Osjetne stanice imaju ukupno $\sim 15\ 500$, u ~ 3000 poprečnih redova po 5 stanica (sl. 20). S gornjeg ruba osjetnih stanica izlaze kroz mrežastu ploču osjetne (slušne) dlačice ("sticala"); preko njih je poput saga rasprostranju pokrovna membrana Cortijevog organa, njegov najnepomičniji i najkruplji dio. Slušne dlačice svojim donjim krajem, tj. onim krajem koji ulazi u trup stanice, dolaze u doticaj sa živčanim vlaknima perifernog nastavka spiralnog ganglia, spletu nervnih stanica koji u posebnom kanalu pužnice prati bazilarnu membranu, a u vezi je sa slušnim živcem.

Kako već rečeno, bazilarna membrana i spiralna koštana ploča dijele spiralni kanal pužnice geometrijski na dva hodnika, od kojih je gornji malim dijelom zauzeti membranoznom spiralnom cijevi. Na vrhu pužnice prostori obaju hodnika izvan membranozne cijevi su spojeni, inače su do u predrvorje labirinta strogo odvojeni. Cijeli prostor između membrana cijevi i zidova spiralnog kanala pužnice ispunjen je tekućinom zvanom *perilimfa*. Na donjem kraju gornjeg hodnika ima pužnica ovalan otvor (*ovalno okno*); u njj pristaje baza stremena i tvori spoj sa srednjim uhom. Nedaleko se otvara u donjem kraju donjeg hodnika prema srednjem uhom malo *okruglo okno* pokriveno elastičnom opnom. Mnogi smatraju da samo zahvaljujući toj membrani u okruglom oknu može titrat perilympfa, inkompresibilna tekućina ograničena inače krutim koštanim zidovima.

Primanje zvuka uhom složen je proces. Iako su radovi H. Helmholtza (1877), kojemu su preteće bili G. J. Duverney (1683) i D. Cotugno (1775), i velikog broja istraživača poslije njega mnogo pridonijeli razumijevanju funkcija slušnog organa, danas je više toga u fiziologiji organa sluha sasvim zagonetno, samo djelomice razjašnjeno ili problematično, nego što je potpuno obja-

šnjeno. Ni o jednoj fazi procesa primanja zvuka, počevši od načina kojim se prenose titraji do organa labirinta, pa, preko načina funkciranja tih organa, do načina kojim se pobuduje slušni živac i oblika u kojem se osjet prenosi u možak, ne postoji suglasnost između fiziologa. U nastavku iznijet će se nazori s kojima se vjerojatno većina slaže.



Sl. 21. Titranje bazilarne membrane uha. Gore: razvijena bazilarna membrana, dolje: relativna amplituda titranja y/y_0 na pojedinih mjestima bazilarne membrane pri slušanju zvuka različitih frekvencija. y_0 amplituda membrane pri 1000 Hz

Uloga vanjskog uha u procesu primanja zvuka sve u svemu je razmjerno mala. U njemu se impedancija bubnjića prilagodava impedanciji zraka. To je prilagođenje vrlo dobro za frekvenciju 800 Hz, prilično je dobro za visoke frekvencije, ali dosta loše za frekvencije ispod 400 Hz.

Prilagoditi znači u telekomunikacijama na generator date EMS i date unutrašnje impedancije priključiti prijemnik s takvom vrijednošću impedancije da se dobije najveće korisna struja, napon ili snaga, već prema tome što je potrebno (prilagodavanje po struji, po naponu ili po snazi), uz određeno frekventno područje i izobličenje. Analogno je značenje izraza prilagođenje u akustici.

Sistem slušnih košćica u srednjem uhu predstavlja polugu nejednakih krakova kojom se titraji bubnjića prenose na ovalno okno u labirintu (kojemu je površina 1/20 površine bubnjića) sa ~ 10 puta manjim amplitudama. Time se razmjerno maloj impedanciji bubnjića u zraku prilagodava znatno veća impedancija ovalnog okna kojeg membrana titra u perlimfici; tlak je na ovalnom oknu uslijed toga 10...20 puta veći nego na bubnjiću. Bez tog pojačanja, maloenergijski titraji niskih tonova ne bi se mogli prenijeti na perlimfici; tonovi visoke frekvencije, naprotiv, mogu se prenijeti na perlimfici i mimo bubnjića, kroz kosti lubanje (koštana vodljivost).

O tome na koji način titra perlimfici u pužnici pod utjecajem titranja stremena i/ili kosti lubanje, mišljenja se razlikuju. Ali bilo tome kako mu drago, sigurno je da spektar tog titranja odgovara spektru zvuka koji ga je proizveo i da periferni organ sluha, bazilarna membrana s Cortijevim organom, to titranje na neki način analizira time što se sastavni tonovi zvuka u tom organu prostorno lokaliziraju, tj. time što tonovi različite frekvencije djeluju na različite dijelove bazilarne membrane, odn. Cortijeva organa. O tome kako se zbiva ta lokalizacija tonova postoji više teorija. U osnovi je još uvijek poučna najstarija od njih, Cotugno-Helmholtzova teorija rezonancije. Prema toj teoriji, bazilarna membrana sa svojim tetivama analogna je žicama klavira. Budući da su duljine tih tetiva različite, prema zakonu rezonancije za svaki ton u titranju perlimfice zatitra grupa tetiva odgovarajuće duljine i uzdrma osjetne stanice u Cortijevu organu, pa im se slušne dlačice taru o pokrovnu membranu, te tako nastaje slušni osjet. Činjenici da ljudsko uho čuje i razlikuje oko 20 000 tonova odgovara anatomski podatak da bazilarna membrana ima oko 20 000 tetiva; budući da u Cortijevu organu ima 3000 slušnih jedinica, tj. redova osjetnih stanica po 5 stanica u svakom redu, treba pretpostaviti da svaka slušna jedinica počiva na 5 ili 6 tetiva bazilarne membrane, te ima sposobnost da analizira 5 ili 6 tonova.

Cotugno-Helmholtzova teorija ima niz nedostataka, pa se od Helmholtzova vremena do danas ne prestaju iznositi i druge teorije. Prema teoriji njemačkog fiziologa Ewalda (1899) i čisti

tonovi podražuju istodobno više mesta u Cortijevu organu duž cijele bazilarne membrane, pa se u možak prenosi kompleksna »slika zvuka«. Po suvremenoj američkoj »teoriji ploha« kod svakog tona vibrira stanoviti dio bazilarne membrane, koji je to veći što je ton jači i koji se pri progresivnom povišenju ili sniženju tona pomiče prema dnu ili prema vrhu pužnice (sl. 21).

U pužnici se energija čujnog zvuka pretvara u električnu energiju. U odsutnosti zvučnog podražaja, između Cortijeva organa i perlimfice može se kod životinja izmjeriti napon od $10\text{--}100 \mu\text{V}$. Zvučni podražaj modulira taj napon; tako modulirani napon može se pojačati i registrirati osciloskopom, a može se također zvučnikom pretvoriti u oscilacije membrane i time vrlo vjerno reproducirati zvuk kojim je organ sluha podražen. Slušni organ djeluje, dakle, kao mikrofon. Način na koji se rezultat podražaja slušnog organa prenosi slušnim živcem u možak još je slabo poznat. Nije npr. objašnjena činjenica da između frekvencije zvuka i frekvencije nervnih impulsa ne postoji praktički nikakva korelacija.

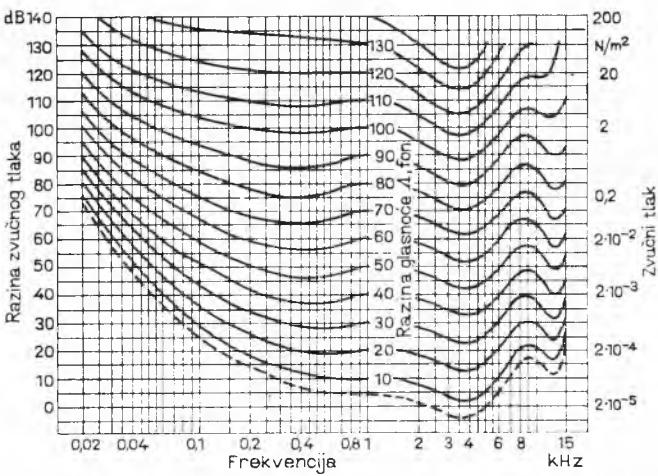
Subjektivna akustika

Posredstvom slušnog organa pretvara se, kako je opisano, zvuk kao fizikalni stimulus (podražaj) u subjektivni doživljaj, slušni osjet. Osnovne su karakteristike tog osjeta: glasnoća, visina i boja. Između te tri karakteristike subjektivnog osjeta i tri karakteristike objektivnog stimulusa koje se u njima odražavaju: njegove jakosti, njegove frekvencije i njegovog sastava, postoji jednoznačna korelacija, ali ta korelacija nije nipošto linearna, niti je metrika objektivnih veličina jednaka metriči subjektivnih veličina.

To znači da npr. dva zvuka kojima jakosti stoje u određenom omjeru ne izazivaju osjeće glasnoće koji stoje u istom omjeru, a omjer glasnoće koji odgovara određenom omjeru jakosti nije neovisan o jakosti zvuka i njegovoj frekvenciji.

Karakteristike podražaja su mehaničke veličine, one se mogu mjeriti fizikalnim metodama i izražavaju se u jedinicama mehanike; karakteristike subjektivnog osjeta mogu se mjeriti metodom eksperimentalne psihologije i za njih se također mogu definirati posebne jedinice. Međutim, eksperimentalna psihologija se po pravilu služi statističkim metodama, pa je već zbog toga nemoguće direktno odrediti psihološke karakteristike subjektivnog osjeta u pojedinačnom slučaju. Fonometrija, nauka i tehnička mjerjenja subjektivnog osjeta sluha, postupa stoga tako da u pojedinačnom slučaju mjeri karakteristike zvučnog stimulusa i iz rezultata tih mjerjenja određuje karakteristike osjeta na osnovi općenitih korelacija između jednih i drugih karakteristika, koje su korelacije određene metodama psihologije. To će u nastavku biti prikazano za glasnoću i visinu tona; za boju tona izgleda da se mora zasad smatrati dovoljnom karakterizacijom spektar podražaja.

Glasnoća. Razina glasnoće. Fon. Korelaciju između razine jakosti zvuka (izražene kao razina zvučnog tlaka L_p) i razine



Sl. 22. Krivulje jednakih razine glasnoće prema ISO

subjektivne glasnoće A prikazana je, u ovisnosti o frekvenciji zvuka, u sl. 22. Razina glasnoće je pri tom izražena u bezdimenzijskim jedinicama *fon* (kratka ph prema phone) analognim

decibelim. Razinu glasnoće od n fona ima slušni osjet kojemu je glasnoća jednaka glasnoći osjeta izazvanog zvukom frekvencije 1000 Hz i razine zvučnog tlaka n dB iznad praga čujnosti. Radi određivanja te korelacije, razina je glasnoće određivana kao prosjek subjektivne ocjene velikog broja slušalaca normalna slуха (kao ocjena prosječnog ili *standardnog slušaoca*) koji su, slušajući objema ušima, glasnoće tonova različite visine usporedivali s glasnoćom referentnog tona frekvencije 1000 Hz, npr. tako da su mu jakost mijenjali dok se glasnoće obaju tonova po njihovoj subjektivnoj ocjeni nisu izjednačile. Razina zvučnog tlaka referentnog zvuka izmjerena u tom trenutku u decibelima jednaka je traženoj razini glasnoće ispitivanog osjeta u fonima. Frekvencija i razina zvučnog tlaka ispitivanog zvuka u tom trenutku predstavljaju koordinate točke na pripadnoj krivulji iste razine glasnoće (*izofoni*) u dijagramu sl. 22.

Međunarodna organizacija za standardizaciju (ISO), koja je izradila taj dijagram, utvrdila je 1937 kao referentni tlak za logaritamsku fonometrijsku ljestvicu tlak

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2 = 2 \cdot 10^{-4} \mu\text{bar}.$$

Razina glasnoće može se definirati i razinom jakosti zvuka, ali budući da je prema jednadžbi (7) jakost zvuka ovisna o gustoći medija i brzini zvuka, treba za referentnu jakost zvuka odrediti, osim referentnog zvučnog tlaka, i referentne vrijednosti tih veličina, odn. treba odrediti takoder medij, njegov osnovni tlak i temperaturu. Ako se kao referentni medij i stanje uzme zrak pod 1 atm i na 20 °C ($\rho_0 = 1,204 \text{ kg/m}^3$, $c = 343,6 \text{ m/s}$), bit će $I_0 = 0,968 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \approx 10^{-8} \text{ W/m}^2$ ili 10 nW/m^2 .

Crtkana krivulja u dijagramu sl. 22 predstavlja krivulju apsolutnog praga čujnosti. Ona prikazuje kako zvučni tlak (odn. jakost zvuka) pri kojoj standardni slušalac upravo prestaje čuti neki čistiti ton ovisi o frekvenciji tog tona.

Ta je krivulja određena tako da su mjereni prosječni zvučni tlakovi pri kojima ispitnici, zdravi mlađi ljudi, u idealnim akustičkim uvjetima (u prostoru ju kojemu inače vlada potpuna tišina) upravo prestaju čuti tonove čujnog područja frekvencije kojima se postepeno smanjuje glasnoća.

Na slici se vidi da je uho standardnog slušaoca na nižim razinama glasnoće mnogo osjetljivije u srednjem području frekvencija nego pri visokim i (naročito) pri niskim frekvencijama. Najosjetljivije je uho u području između 2000 i 5000 Hz.

Najveće glasnoće zvuka koje čovjek može podnijeti bez bola iznose oko 125 ph, pa se izofona 120 ili 130 ph u dijagramu sl. 22 naziva krivulja praga bola. Kako se vidi, i zvučni tlak na pragu bola je ovisan o frekvenciji, ali mnogo manje nego na granici čujnosti.

Najmanja razlika u razini glasnoće koju čovječe uho može osjetiti iznosi ~ 1 ph. (Dijelovi fona, prema tome, nemaju značenja). U tabl. 5 navedene su razine glasnoće za neke zvučne pojave u svakodnevnom životu.

Tablica 5
NEKE RAZINE GLASNOĆE

Izvor zvuka ili zvučni prostor	A, ph
Prag čujnosti	0
Šuštanje lišća pri vrlo slabom luhoru	10
Vrlo tihi vrt	20
Ulični šumovi u vrlo tihom stambenom predjelu	30
Prigušen razgovor	40
Oobičan razgovor. Tiha ulica u velegradu	50
Radio-aparat pri "sobnoj glasnoći"	60
Buka na prometnom trgu	70
Teretni automobil na 5 m udaljenosti. Unutrašnjost tramvaja	80
Električna automobilistička truba na 5 m udaljenosti	90
Dvorana tkačkih strojeva ili rotacija u tiskari novina	100
Kovačnica kotlova. Pneumatski čekić na 250 m udaljenosti	110
Avionski motor na 250 m udaljenosti	120
Bolna buka. Hitac iz puške pred uhom strijelca	130

Razina glasnoće koju čovjek osjeća kad sluša više (n) zvukova iste razine jakosti manja je od zbroja pojedinačnih razina, jer je razina glasnoće onda proporcionalna $\log \frac{nI}{I_0} = \log \frac{I}{I_0} + \log n$, što

$$\text{je manje nego } n \log \frac{I}{I_0} = \log \left(\frac{I}{I_0} \right)^n.$$

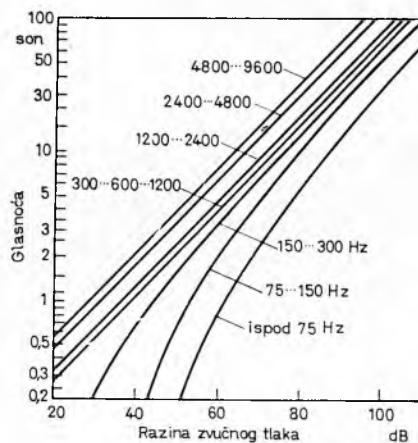
Skala glasnoće. Son. Razina glasnoće izražena u fonima predstavlja logaritamsku razliku u odnosu prema referentnoj vrijednosti, kao i razina jakosti zvuka u decibelim, s pomoću koje je definirana. Logaritamsko izražavanje glasnoće može biti praktično s obzirom na veliki raspon glasnoće između granice čujnosti i granice bola, ali s obzirom na to da je logaritamska ljestvica jakosti zvuka izabrana i zato što, prema Fechnerovom psihofizičkom zakonu, glasnoća (intenzitet osjeta) raste aritmetičkom progresijom kad jakost zvuka (podražaja) raste geometrijskom progresijom, logičnije je — a za neke svrhe i neizbjegivo — da se razina jakosti zvuka (ili zvučnog tlaka) mjerena na logaritamskoj ljestvici korelira s glasnoćom mjerrenom na linearnoj ljestvici. To je učinila ISO uvedenjem jedinice *son* za glasnoću. Prema definiciji te jedinice koju je dala ISO, glasnoću 1 son ima osjet zvuka kojemu je razina glasnoće 40 fona, a svakom povišenju razine glasnoće od 10 fona odgovara podvostručenje glasnoće izražene u sonima. To znači da između numeričkih vrijednosti glasnoće N u sonima i razine glasnoće A u fonima postoje odnosi:

$$N = 2^{(A/\text{ph} - 40)/10} \text{ son}, \quad (12)$$

$$A/\text{ph} = 10 \log_2 N/\text{son} + 40 \approx \frac{1,2 + \lg N/\text{son}}{0,03},$$

tj. logaritam glasnoće i razina glasnoće među sobom su linearno ovisni, kao što i mora biti, jer je razina glasnoće također logaritam (relativne) glasnoće.

S pomoću te jednadžbe i dijagrama sl. 22 mogu se konstruirati krivulje koje prikazuju odnos između razine zvučnog tlaka u decibelim i glasnoće zvuka u sonima. Sl. 23 prikazuje takve krivulje za frekvencijske pojase široke jednu oktavu. Vidi se



Sl. 23. Odnos između glasnoće izražene u sonima i razine zvučnog tlaka u decibelim za frekvencijske pojase široke jednu oktavu i difuzno zvučno polje

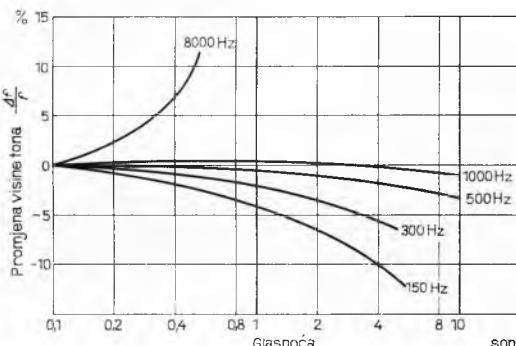
da je samo za više frekvencije ili velike glasnoće definicija sona u skladu s Fechnerovim zakonom (linearne ovisnosti glasnoće od logaritma relativnog zvučnog tlaka). Eksperimenti su pokazali da se iznad glasnoće od 1 sona stvarno doživljene promjene glasnoće slažu s sonima koje predviđa jedn. (12).

Vrijednosti se glasnoće tonova u sonima mogu zbrajati neovisno o frekvencijama ako su pojedinim tonovima frekvencije dovoljno udaljene jedna od druge. To je glavna prednost jedinice son zbog koje je ona uvedena: u borbi protiv buke se npr. glasnoća buke može izračunati kao zbroj glasnoća frekventnih područja od kojih se buka sastoji, a pri traženju veze između boje doživljjenog tona i spektra podražaja može biti korisna samo u sonima izražena glasnoća, jer je glasnoća složenog tona u sonima zbroj glasnoća sastavnih čistih tonova. Međutim, ako su frekvencije sastavnih tonova bliske jedna drugoj, glasnoća je složenog tona manja od zbroja glasnoće sastavnih tonova; ako se, napose, sastavne frekvencije nalaze unutar pojasa frekvencijā kojoj je širina manja od određene kritične vrijednosti (nekoliko desetaka ili stotina herca, v. sl. 23), glasnoća složenog tona bit će jednak glasnoći što bi je izazvalo titranje kojemu je frekvencija neka sredina frekvencijā sastavnih tonova a snaga jednak zbroju snaga sastavnih tonova.

Visina tona je psihokustička veličina po kojoj se dva tona mogu razlikovati kao dublji (tammiji) i viši (svjetliji).

Izrazi »dubok« i »visok« ton potječu, najvjerojatnije, od načina pisanja nota: tammiji se tonovi pišu dublje u crtovlju ili ispod njega, svjetliji se pišu više u crtovlju ili iznad njega.

Kako je naprijed rečeno, uobičajilo se visinu tona identificirati s frekvencijom podražaja, ili bar smatrati frekvenciju podražaja jednim vanjskim fizičkim uzrokom visine tona. Međutim, psihokustički su pokusi pokazali da osim frekvencije podražaja na subjektivnu visinu tona utječe također njegova jakost i struktura, iako, istina, mnogo manje i u osjetljivoj mjeri uglavnom samo kod čistih tonova. Tako se, npr., subjektivna visina čistim tonovima frekvencije iznad 5000 Hz povisuje, a tonovima frekvencije ispod 500 Hz snizuje, kad se glasnoća povećava (sl. 24). I



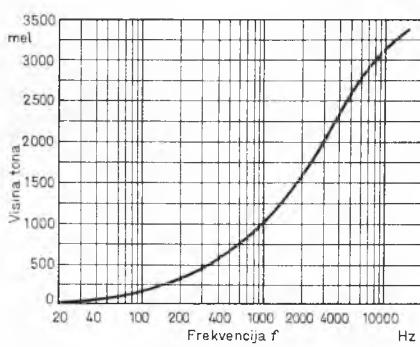
Sl. 24. Promjena osjeta visine tona pri povećanju glasnoće

duljina trajanja tona djeluje donekle na subjektivno osjećanje visine tona; emitirani u veoma kratkim impulsima, niski tonovi osjećaju se kao nešto malo viši, a visoki kao nešto malo niži nego kad se emitiraju neprekidno.

Korelacija između subjektivne visine tonova i njihove frekvencije pokazuje da je ljestvica frekvencijā — bilo linearna u hercima bilo logaritmička u oktavama — daleko od toga da bude identična s ljestvicom subjektivne visine tona.

Postupak kojim se eksperimentalno odredila korelacija između frekvencije i visine tona analogan je statističkom postupku za određivanje korelacije između jačine i glasnoće zvuka. Svaki slušač u testiranoj grupi sluša izmjenično dva čista tona, od kojih jednomože mijenjati visinu dok je jedan ton po njegovoj subjektivnoj ocjeni dvostruko viši od drugog. Ponavljajući taj postupak s parovima tonova dok nije ispitano cijelo područje čujnih frekvencija, i određivši proizvoljno jednu referentnu visinu tona i veličinu jedinice, definirana je skala subjektivne visine tona.

Sl. 25. prikazuje korelacijsku između subjektivne visine i frekvencije tonova. Jedinica subjektivne visine tona je *mel* (od melodia); vrijednost od 1000 mela dana je tonu frekvencije 1000 Hz i jakosti 40 dB. U području između 500 i 5000 Hz uho zamjećuje promjenu frekvencije od 3%.



Sl. 25. Ovisnost subjektivne visine tonova o frekvenciji

Budući da su psihokustički doživljaji sklada i nesklada među tonovima određeni više fizičkim karakteristikama podražaja (prvenstveno njegovom frekvencijom) nego subjektivnom visinom doživljenih tonova, subjektivna visina nema veliko značenje u muzici.

Maskiranje tonova je pojавa da se prag čujnosti jednog tona prisutnošću drugog tona povisuje. Taj se efekt kvantitativno izražava brojem decibela za koji treba razinu jakosti ili zvučnog

tlaka nekog tona (maskiranog) povišiti iznad praga čujnosti u tini, da bi se on upravo čuo u prisutnosti drugog tona (maskirajućeg). Pri maskiranju među čistim tonovima utvrđeni su ovi osnovni efekti: a) efekt raste s razinom jakosti maskirajućeg tona; b) efekt je najveći kad je razlika između frekvencija maskiranog i maskirajućeg tona mala. Kad su te dvije frekvencije skoro jednakе, efekt se nešto smanjuje zbog nastajanja treptaja (udara) (v. *Akustika*, TE 1, 56); c) efekt je jači kad je frekvencija maskiranog tona viša od frekvencije maskirajućeg tona, nego kad je odnos frekvencija obrnut; stoga smetnje niskih frekvencija pri reprodukciji zvuka imaju znatno jači utjecaj na tonove srednjih frekvencija nego visokofrekventne smetnje iste jakosti.

Kad su oba tona, maskirani i maskirajući, na većoj razini jakosti, slušaoci čuju, osim tih tonova, i tzv. *subjektivne tonove*, tj. tonove kojih nema u podražaju, nego nastaju u organu sluha, vjerojatno zbog nelinearnosti mehanizma primanja i prenosa zvuka u njemu. Ti subjektivni tonovi ili su harmonici obaju tonova ili su im frekvencije zbrojevi i razlike frekvencija tih tonova i njihovih harmonika.

Za maskiranje složenih tonova vrijedi isto što i za čiste, ako se uzmu u obzir, osim sastavnih frekvencija, također subjektivni tonovi. Kad je posrijedi govor maskiran šumom, često se umjesto povišenja praga čujnosti određuje *prag razgovjetnosti* ili *razumljivosti*, tj. razina jakosti zvuka potrebna da bi slušač jasno čuo bilo izgovorene slogove bez smisla (razgovjetnost), bilo smislene riječi (razumljivost). Prag razumljivosti je za 10 ... 15 dB viši od praga čujnosti bilo u prisutnosti bilo u odsutnosti signala smetnji.

Važan je slučaj kad je maskirajući zvuk statističke prirode, tj. kad mu je energija raspodijeljena među sve frekvencije frekvencijskog pojasa odredene širine. Takav zvuk naziva se *bijeli šum* (u analogiji sa svjetлом) kad je u dotičnom frekvencijskom pojusu energija jednolično raspodijeljena. Maskirajuće djelovanje pojasa bijelog šuma na ton kojemu je frekvencija jednaka njezinoj središnjoj frekvenciji ovisi na karakterističan način o širini pojasa. Ako se, polazeći od maskirajućeg uskopoljasnog bijelog šuma (nekoliko herca), pojaz proširuje uz konstantnu spektralnu razinu jakosti šuma (konstantnu jakost zvuka dijela pojasa širokog 1 Hz), efekt maskiranja raste do odredene kritične širine pojasa; dalje širenje pojaza ne povećava maskiranje. Kritična širina maskirajućeg pojaza ovisi o frekvenciji maskiranog tona: do ~ 1000 Hz iznosi oko 50 Hz, onda sve brže raste i postiže do 600 Hz kod frekvencije maskiranog tona od 10 000 Hz.

TEHNIČKA AKUSTIKA

Elektroakustika (tehnička akustika), kao što je rečeno na početku ovog članka, bavi se u osnovi pretvorbom zvuka u električne oscilacije i obrnuto. Uredaji koji neposredno služe za takve pretvorbe zovu se *elektroakustički pretvarači*. Oni su neophodni za početak i kraj elektroakustičkog sistema (lanca), tj. sistema kojim se reproducira zvuk: na početku sistema je pretvarač zvuka u električne oscilacije, *mikrofon*, a na kraju pretvarač električnih oscilacija u zvuk, *zvučnik* ili *slušalice*. Između njih nalazi se *prenosni uređaj*, koji može biti vod, pojačalo, radio-odašiljač i prijemnik, sistemi za snimanje zvuka na gramofonske ploče i reprodukciju zvuka s njih, uređaj za snimanje i reprodukciju zvuka s pomoću magnetske trake (magnetofon), uređaji za fotografsko snimanje zvuka na film i reprodukciju zvuka s filma, itd.

Od cijelog elektroakustičkog sistema traži se da zvuk reproducira vjerno. To — gledano s fizikalnog stanovišta — znači da trenutne vrijednosti zvučnog tlaka na objemu ušima treba da u idealnom slučaju na mjestu reproduciranja zvuka budu linearne razmjerne tim vrijednostima na mjestu snimanja. Da bi se tome zahtjev uđovoljilo, treba — među ostalim — da tzv. frekvencijska karakteristika cjelokupnog sistema bude u području čujnih frekvencija linearna, da se na kraju prijenosnog puta ne pojavljuju nedozvoljena izobličenja i da se — radi pravilnog osjeta smjera iz kojeg zvuk dolazi (prostornog osjeta zvuka) — zvučne slike dovode na lijevo i na desno uho odvojenim prenosnim kanalima. Posljednji uvjet postavlja se pri najkvalitetnijem, stereofonskom, prijenosu zvuka i obraden je u posebnom poglavljju ovog članka. Ovdje su u nastavku data još neka objašnjenja o frekvencijskoj karakteristici, o usmjernoj karakteristici i o izobličenju.

Frekvencijska karakteristika elektroakustičkih uređaja (mikrofona, pojačala, zvučnika, itd.), ili i cijelog elektroakustičkog sistema, daje ovisnost omjera između ulazne i pripadne izlazne veličine (npr. između zvučnog tlaka na ulazu i napona na izlazu, napona na ulazu i izlazu, napona na ulazu i zvučnog tlaka na izlazu) o frekvenciji. Omjer između ulazne i izlazne veličine (koji se npr. kod mikrofona naziva osjetljivošću, a kod zvučnika reprodukcijom) izražava se obično u decibelima.

Razlog što se i frekvencija u frekvencijskim karakteristikama izražava u decibelima isti je kao i za izražavanje razine zvučnog tlaka u tim jedinicama (v. str. 301): veliki raspon numeričkih vrijednosti frekvencije u području čujnosti zvuka i činjenica da se visina tona mijenja aritmetičkim redom kad se frekvencija mijenja geometrijskim redom (v. str. 303). Kao referentnu frekvenciju uzima se frekvencija 1000 Hz jer su u području oko te frekvencije zvučni tlakovi najčešći i najveći.

Korigirane frekvencijske karakteristike koje se propisuju za reprodukciju zvuka s pomoću gramofonskih ploča ili magnetofona sastoje se od pojedinih linearnih dijelova. Radi međunarodne standardizacije, oblik se grafičkog prikaza takvih karakteristika definira graničnim frekvencijama f_{gr} (ili graničnim kružnim frekvencijama $\omega_{gr} = 2\pi f_{gr}$) pri kojima počinje i završava pojedini linearni dio (tj. pri kojima se mijenja nagib krivulje) i logaritmičkim omjerima promatranih veličina pri tim frekvencijama. Umjesto granične frekvencije ili kružne frekvencije, u posljednje se vrijeme navode *vremenske konstante*, koje s tim veličinama stoje u ovim odnosima:

$$f_{gr} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad \text{i} \quad \omega_{gr} = \frac{1}{\tau}.$$

Češće upotrebljavanim graničnim frekvencijama f_{gr} odgovaraju vrijednosti vremenskih konstanata τ prema ovoj tablici:

f_{gr} , Hz	50	250	318	400	500	800	1600	4550	8500
τ , μs	3180	636	500	397	318	200	100	53	19

Budući da se tok frekvencijskih karakteristika postiže elementima R i C u strujnom krugu, iz vremenske se konstante mogu dobiti njihovi iznosi primjenom izraza $\tau = R C$, a uz to se odmah dobiva i nagib krivulje u prelaznoj tački karakteristike.

Usmjerna karakteristika (direktivna karakteristika) elektroakustičkog pretvarača pokazuje ovisnost napona na izlaznim stezaljkama mikrofona, odn. zvučnog tlaka pred zvučnikom, u ovisnosti o kutu upada, odn. kutu emitiranja zvučnog vala. Prikazuje se redovito polarnim dijagramom (v. sl. 28 i 97, također *Akustika*, TE 1, str. 61, 62 i 64). Usmjerna je karakteristika ovisna o frekvenciji primarnih, odn. emitiranih tonova.

Izobličenje je nepoželjna promjena signala u toku njegova prijenosa i obrade. Do izobličenja dolazi kad frekvencijska karakteristika sistema kojim se prenosi signal (mikrofon, pojačalo, zvučnik, magnetofon itd.) nije pravocrtna i horizontalna. Izobličenje se općenito dijeli na linearno i nelinearno.

Linearno izobličenje postoji kad se cijeli frekvencijski spektar signala ne pojačava ili oslabljuje podjednako. U tom slučaju dolazi do zapostavljanja pojedinih frekvencijskih područja. Pri tome se mijenjaju samo amplitude ili faze na pojedinim frekvencijama, a ne pojavljuju se neke nove komponente. Uho osjeća linearna izobličenja kao promjenu boje tona.

Nelinearna izobličenja nastupaju kad je prijenosna karakteristika određenog sistema [npr. $p = f(F)$, $u_{1z} = f(u_{1z})$] zakrivljena. Ulagani sinusni signal bit će nakon prolaza kroz takav sistem na izlazu izobličen. Analiza takva signala pokazuje da se on sastoje od osnovnog signala i niza harmonika. O simetričnom nelinearnom izobličenju govori se kad je izlazni signal u odnosu prema ulaznom simetrično izobličen. U tom se slučaju pojavljuju samo neparni harmonici ($f_3, f_5, \dots, f_{2t+1}$, $i = 1, 2, \dots$). Nesimetrično nelinearno izobličenje daje nesimetrična prijenosna karakteristika; u tom se slučaju dobiju parni harmonici (f_2, f_4, \dots, f_2). Takva izobličenja sinusnog (harmoničkog) signala zovu se ponekad također *harmonička izobličenja*. Ulagana zvučna slika sastoji se, međutim, skoro uvijek od složenih tonova; u tom se slučaju pojavljuju na izlazu nove neharmoničke komponente. Djeluju li, npr., na ulaz prijenosnog sistema dva periodična signala različitih frekvencija,

nastat će na izlazu ne samo viši harmonici, nego i neharmonički kombinirani tonovi koji su za uho neugodniji od harmoničkih. Ti tonovi nastaju prema zakonu

$$f_k = if_1 \pm jf_2, \quad i, j = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

gdje f_1 i f_2 znače osnovne frekvencije. Nastali kombinirani tonovi i nadvalovi tvorit će daljnje kombinacije.

Kao mjera za izobličenje služi faktor izobličenja k :

$$k = \sqrt{\frac{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots}{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots}},$$

gdje je A_1 efektivna vrijednost amplitude napona struje ili tlaka osnovnog tona, a A_2, A_3, \dots efektivne vrijednosti amplituda viših harmonika. Radi razlikovanja simetričnih od nesimetričnih izobličenja primjenjuju se još i neki drugi faktori.

Tranzijentna izobličenja nastaju kao rezultat brzih promjena amplituda ili/i frekvencija. Ispitivanja se vrše s pomoću pravokutnih signala ili impulsa koji se sastoje od snopa sinusoidnih titranja konstantne amplitude, pa se iz vremena utitravanja i istitravanja kao i oblika krivulje može zaključiti koliko je tranzijentno izobličenje.

Pri prostornom slušanju, koje je normalna pojava, treba voditi računa i o *prostornom izobličenju*, tj. o promjeni smjera zvučnih valova.

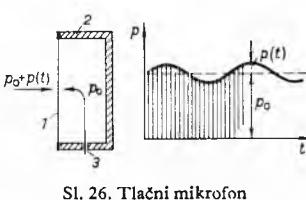
U nastavku ovog članka obradeni su najprije glavni pretvaraci (mikrofoni i zvučnici), pa snimanje i reprodukcija zvuka na gramofonskim pločama, magnetofonu i fotografiskom filmu, onda stereofonija te prostorna i gradevinska akustika, a na koncu je obradenja podvodna akustika i rečeno je nešto o infrazvuku i elektroakustičkim mjerjenjima. Za telefoniju, radio i ultrazvuk vidi odnosne članke u ovoj enciklopediji.

Mikrofoni

Mikrofoni su elektroakustički pretvarači koji akustičku energiju posredstvom mehaničkih sistema pretvaraju u električnu.

Postoji akustička i električna podjela mikrofona. Prema akustičkoj podjeli mikrofoni mogu biti tlačni ili gradijentni, ovisno o tome da li akustički tlak djeluje na membranu samo s jedne strane ili s obiju strana. Električna podjela svrstava mikrofone, prema mehaničko-električnom sistemu kojim se pretvaraju mehaničke vibracije membrane u napone zvučne frekvencije, u elektrodinamičke, kondenzatorske, piezoelektrične, ugljene i dr. mikrofone. Prema tome može se npr. kondenzatorski mikrofon izvesti bilo kao tlačni bilo kao gradijentni mikrofon.

Tlačni mikrofoni (sl. 26). Membrana 1 tlačnog mikrofona ugradena je u kućište 2 tako da zvučni tlak djeluje na nju samo s jedne strane. Tlak koji s vanjske strane djeluje na membranu



Sl. 26. Tlačni mikrofon

sastavljen je od atmosferskog tlaka p_0 i tlaka zvučnih komponenta $p(t)$. Unutar kućišta mikrofona vlada atmosferski tlak p_0 jer rupa 3 spaja unutrašnjost mikrofona s vanjskim prostorom. Na membranu djeluje stoga samo zvučni tlak $p(t)$ silom koja je jednaka umnošku zvučnog tlaka $p(t)$ i površine S membrane, $F = S p(t) = S p_m \cos \omega t$, gdje je p_m amplituda zvučnog tlaka. Može se pretpostaviti da je membrana mikrofona mehanički titrajni sistem s jednim stupnjem slobode. Ako se masa membrane označi sa m_m , otpor trenja sa R_m i elastičnost membrane sa C_m , diferencijalna jednadžba gibanja membrane za sinusoidno titranje glasi:

$$m\ddot{x} + R_m\dot{x} + \frac{1}{C_m}x = S p_m \cos \omega t, \quad (13)$$

gdje x znači pomak, $\dot{x} = dx/dt$ brzinu i $\ddot{x} = d^2x/dt^2$ ubrzanje membrane. Uz konstantan zvučni tlak najveća amplituda pomaka nastupit će pri rezonantnoj frekvenciji sistema:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{m_m C_m}}.$$

Promatraju li se amplitudne pomake u ovisnosti o frekvenciji, mogu se razlikovati tri frekvencijska područja: područje iznad rezonantne frekvencije ($\omega \gg \omega_r$), područje oko rezonantne frekvencije ($\omega \approx \omega_r$), i područje ispod rezonantne frekvencije ($\omega \ll \omega_r$). U svakom od tih područja prevladava prakšički samo jedna od unutarnjih sile koje se prema diferencijalnoj jednadžbi (13) suprotstavljaju vanjskoj sili F . U području iznad rezonantne frekvencije vanjska se sila troši praktički samo na svladavanje inercije mase $m\ddot{x} = S p_m \cos \omega t$, u području oko rezonantne frekvencije na svladavanje trenja $R_m \dot{x} = S p_m \cos \omega t$, a u području ispod rezonantne frekvencije na svladavanje sila uzrokovanih elastičnošću sistema $x/C_m = S p_m \cos \omega t$.

Iz naprijed rečenog slijedi da je tlačnim elongacijskim mikrofonima, tj. mikrofonima kod kojih je elektromotorna sila razmerna elongaciji (ugljenim, kristalnim, kondenzatorskim), izlazni napon konstantan u prenošenom frekvencijskom području, koje se nalazi ispod rezonantne frekvencije mehaničkog sistema. Kod mikrofona kojima je izlazni napon razmjeran titrajnoj brzini (elektrodinamičkih i elektromagnetskih), titrana brzina i zvučni tlak neovisni su o frekvenciji u području oko rezonantne frekvencije, ako je sistem jako prigušen. Rezonantna frekvencija ovih mikrofona mora se dakle nalaziti u sredini prenošenog područja.

Budući da je sila kojom zvučni tlak djeluje na membranu tlačnog mikrofona neovisna o kutu upada zvuka, usmjerna je karakteristika tlačnog mikrofona kružna, tj. prikazana je u polarnom dijagramu kružnicom (v. sl. 28 a).

Gradijentni mikrofoni. Kućište gradijentnih mikrofona načinjeno je tako da zvučni tlak djeluje s obiju strana membrane (sl. 27). Na prednju stranu djeluje tlak p_1 , a na stražnju p_2 . Zbog različite duljine puta zvučnog vala, između ovih tlakova dolazi do fazne razlike ψ .

Označi li se sa d razlika između duljina putova zvučnih valova od izvora do prednje strane i do stražnje strane membrane, može se fazna razlika ψ (u radianima) naći iz odnosa: $d/\lambda = \psi/2\pi$, tj. $\psi = 2\pi d/\lambda$. Stavi li se za omjer $2\pi/\lambda = \omega/c = k$, dobije se da je $\psi = k d$. Na prednju stranu membrane djeluje tlak $p_1 = p_m \cos \omega t$, a na stražnju stranu tlak $p_2 = p_m \cos (\omega t - k d)$. Na membranu, dakle, djeluje sila:

$$F = S(p - p_1) = S p_m [\cos \omega t - \cos(\omega t - k d)].$$

Ta je sila proporcionalna promjeni tlaka po jedinici duljine, znači gradijentu tlaka, pa odatle i naziv tih mikrofona. Pretpostavi li se da je duljina d mnogo manja od valne duljine λ , dobije se, razvijanjem u red i zanemarenjem nekih članova, za silu izraz:

$$F \approx -S p_m k d \sin \omega t \approx -S p_m \frac{\omega}{c} \sin \omega t.$$

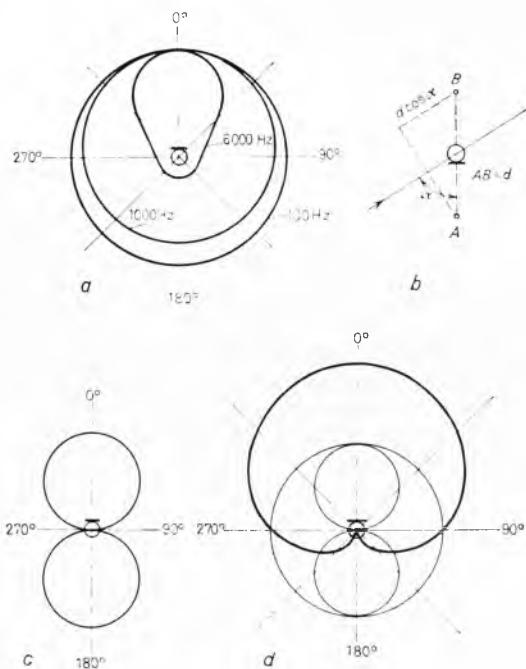
Sila je uz stalan tlak proporcionalna faktoru $k = \omega/c$, dakle kružnoj frekvenciji ω . Diferencijalna jednadžba gibanja membrane gradijentnog mikrofona glasi:

$$m\ddot{x} + R_m \dot{x} + \frac{x}{C_m} = -C p_m \omega \sin \omega t,$$

gdje je: $C = s d/c$. I ovdje u tri frekvencijska područja prevladavaju različite unutarnje sile: u području iznad rezonantne frekvencije, $\omega \gg \omega_r$, sila $m\ddot{x} = -C p_m \omega \sin \omega t$, oko rezonantne frekvencije, $\omega \approx \omega_r$, sila $R_m \dot{x} = -C p_m \omega \sin \omega t$, a ispod rezonantne frekvencije, $\omega \ll \omega_r$, sila $x/C_m = -C p_m \omega \sin \omega t$.

Iz daljnog izlaganja vidjet će se da je elektromotorna sila jednih mikrofona razmjerna titrajnoj brzini v , a drugih elongaciji x . Za sinusoidno titranje vrijedi $x = \int v dt$, a daljim integriranjem dobije se za ubrzanje izraz $a = v/\omega$. Integriranjem prvih dviju jednadžbi za frekvencijska područja dobiva se da u području $\omega \gg \omega_r$ vrijedi jednadžba $m\ddot{x} = C p_m \cos \omega t$, a u području $\omega \approx \omega_r$ jednadžba $R_m \dot{x} = C p_m \cos \omega t$. Iz prve se jednadžbe vidi da je

za gradijentne mikrofone u području $\omega \gg \omega_r$ brzina titranja $v = \dot{x}$ neovisna o frekvenciji i proporcionalna zvučnom tlaku, a iz druge da je u području $\omega \approx \omega_r$ pomak x neovisan o frekvenciji i proporcionalan zvučnom tlaku. Kao gradijentni mikrofoni mogu se, dakle, za područje $\omega \gg \omega_r$, upotrijebiti mikrofoni kojima je EMS proporcionalna brzina titranja v (elektromagnetski, elektrodinamički) s time da im rezonantno područje leži ispod radnog područja. Za područje oko rezonancije mogu se, međutim, primijeniti kao gradijentni mikrofoni samo mikrofoni kojima je EMS proporcionalna pomaku (ugljeni, kristalni, kondenzatorski).



Sl. 28. Usmjernje karakteristike mikrofona, a) Kružna karakteristika, b) ovisnost osjetljivosti gradijentnog mikrofona o kutu upada zvuka, c) osmičasta karakteristika, d) kardioidna karakteristika

Usmjerna karakteristika gradijentnog mikrofona ima oblik osmice (osmičasta karakteristika, sl. 28 c). Naime, budući da udaljenost između prednje i stražnje strane membrane ovisi o kutu upada zvučnog vala, i gradijent tlaka ovisan je o tom kutu. Ako put zvučnog vala od prednje do stražnje strane membrane pri okomitom upadu zvuka iznosi d (sl. 28 b), pri upadu pod kutom α smanjiće se taj put na vrijednost $d \cos \alpha$, tj. izlazni napon razmjeran je kosinusu kuta upada. Očigledno je da gradijentni mikrofon ima najveću osjetljivost pri okomitom upadu zvučnog vala bilo s prednje ili stražnje strane membrane, dok je pri bočnom upadu ($\alpha = 90^\circ$ ili 270°) osjetljivost jednaka nuli.

Kombinacija tlačnog i gradijentnog mikrofona. Spajanjem tlačnog i gradijentnog mikrofona u seriju dobiva se mikrofonski uređaj kojemu usmjerna karakteristika ima oblik bubrega ili kardioide (bubrežasta ili kardioidna karakteristika, sl. 28 d). Uz pretpostavku da oba mikrofona u aksijalnom smjeru imaju jednaku osjetljivost, tj. da su u tom slučaju izlazni naponi $e_1 = e_2$, uz upad zvučnog vala pod kutom α bit će ukupni izlazni napon

$$e = e_1 + e_2 \cos \alpha = e_1 (1 + \cos \alpha).$$

Sl. 28 d pokazuje također kako kardioidna usmjerna karakteristika nastaje kao zbroj kružne i osmičaste karakteristike. Zvuk koji dolazi na jednu stranu mikrofona s osmičastom karakteristikom u protufazi je sa zvukom koji dolazi na drugu stranu (npr. membrana mikrofona na sl. 27 na jednoj je strani izbočena kad je na drugoj ulegnutu); stoga je radijusvektor svake točke kardioidne karakteristike na njezinom gornjem dijelu zbroj radijusvektora točaka iste amplitude kružne i osmičaste karakteristike, a na njezinom donjem dijelu razlika tih radijusvektora.

Ugljeni mikrofon (sl. 29) sastoji se od metalne kutije poljupljene membranom i ispunjene ugljenim zrnacima. Električni otpor kroz sloj ugljenih zrnaca ovisi o tlaku što ga membrana pod utjecajem zvučnih valova vrši na ugljena zrna prilikom svog titranja. Istosmjerna struja koja teče u mikrofonskom krugu mijenja stoga svoju jakost (biva modulirana) u ritmu zvučnih va-

lova. Promjena otpora ΔR razmjerana je elongaciji x , $\Delta R = C x$. Ovdje je C faktor proporcionalnosti koji ne ovisi o frekvenciji. Elektromotorna sila izvora E_0 tijera u mikrofonskom krugu struju $I_0 = E_0/R_0$, gdje je R_0 ukupni otpor kruga (uključujući i izvor). Trenutna vrijednost izmjenične komponente elektromotorne sile e koja nastaje zbog promjene otpora ΔR iznosi

$$e = I_0 \Delta R = C \frac{E_0}{R_0} x.$$

Ona je, dakle, ovisna o elongaciji, a neovisna o frekvenciji.

Ugljeni mikrofon ima i danas veliku primjenu u telefoniji zbog svoje velike osjetljivosti, $10 \text{ mV}/\mu\text{bar} = 100 \text{ mV}/(\text{N}/\text{m}^2)$ uz optereni otpor 600Ω .

Kristalni (piezoelektrični) mikrofon. Na pločicama kristala Seignetteove soli (ili nekog drugog materijala koji pokazuje piezoelektrični efekt) dobiva se pri savijanju električni napon zbog sile koja nastaje kao posljedica zvučnog tlaka (sl. 30). Elektromotorna sila e koja se dobiva na staničkim oblogama pločica razmjerana je elongaciji membrane x , pa je $e = C x$. I ovdje je C faktor proporcionalnosti neovisan o frekvenciji.

Danas se primjenjuju dvije osnovne grupe piezoelektričnih tvari: kristali turmalina, kvarca, Seignetteove soli i dr. i keramički materijali kao, npr., pečeni barijum-titanat. Kristalni mikrofoni grade se i s više kristalnih čelija, koje se spajaju paralelno, serijski ili mješovito. Mikrofoni izrađeni od kristala neotporni su prema vazi i povišenoj temperaturi, ali imaju dosta veliku osjetljivost. Unutarnji otpor tih mikrofona određen je njihovim kapacitetom, koji iznosi $600 \dots 3000 \text{ pF}$.

Kondenzatorski mikrofon prikazan je shematski na sl. 31. Titranjem metalne ili metalizirane membrane mijenja se kapacitet mikrofona C_m za ΔC . Zbog toga stalno dolazi do dodatnog punjenja i pražnjenja kondenzatora u ritmu zvučnog signala. Izmjenična struja (punjenja i pražnjenja) stvara na radnom otporniku R (koji mora imati dovoljno velik otpor) izmjenični pad napona koji je razmjeran elongaciji:

$$e = E_0 \frac{C}{C_m + C_p} = C x.$$

(C_p je štetni kapacitet dovoda.) U modernoj izvedbi kondenzatorskog mikrofona membrana je metalna ili metalizirana folija debljine $10 \dots 15 \mu\text{m}$, napeta ispred čvrste metalne elektrode na udaljenosti $10 \dots 20 \mu\text{m}$.

Kondenzatorski mikrofon služi kao kvalitetan mikrofon. Istosmjerni polarizacioni napon E_0 iznosi $\sim 200 \text{ V}$. Rezonantna frekvencija kondenzatorskog mikrofona nalazi se iznad prenošenog područja. Visoka rezonantna frekvencija postiže se malom masom membrane i velikom krutosti zračnog jastuka. Međutim, uz veću krutost zračnog jastuka postaju amplitude membrane manje, dakle smanjuje se i osjetljivost. Krutost zračnog jastuka može se smanjiti, a da se pri tome kapacitet mikrofona gotovo ne promijeni, ako se na protuelektrodi izvedu uvri ili kanali (v. sl. 31). Time se osjetljivost mikrofona znatno poveća, te ona iznosi $3 \dots 5 \text{ mV}/\mu\text{bar}$. Unutarnji otpor kondenzatorskog mikrofona je kapacitivan i određen je kapacitetom mikrofona, koji iznosi $\sim 50 \text{ pF}$.

Granična frekvencija kondenzatorskog mikrofona. Gornju graničnu frekvenciju zračnog kristalnog i kondenzatorskog mikrofona određuje uglavnom frekvencija mehaničke rezonancije; donja

granična frekvencija kondenzatorskog mikrofona (kao i kristalnog), naprotiv, ovisi o električnim veličinama. Kapacitet mikrofona čini s opteretnim otporom visokopropusni filter. Donja granična frekvencija dobiva se iz uvjeta

$$R = \frac{1}{2\pi f C}, \quad \text{dakle} \quad f = \frac{1}{2\pi R C}.$$

Npr., ako kapacitet mikrofona iznosi 100 pF , a donja granična frekvencija treba da bude 30 Hz , iz gornje formule izlazi vrijednost otpora veća od $50 \text{ M}\Omega$. Tako veliki otpori na ulaznom krugu stavljuju velike zahtjeve ulaznim tranzistorima i elektronikama.

Elektronički sklopovi s kondenzatorskim mikrofonom dijele se na niskofrekvenčne i visokofrekvenčne. U niskofrekvenčnom sklopu napon dobiven na opteretnom otporu privodi se direktno pojačalu. Dakle, mikrofon je u krugu signalne rešetke ili u krugu baze tranzistora. U shemi na sl. 32 krug mikrofona je spojen na katodno pojačalo kojem je ulazni otpor zbog serijske strujne negativne reakcije vrlo velik, tako da se i uz manje otpore može postići niska donja granična frekvencija. Izlazni otpor takvog pojačala vrlo je mali, tako da se pojačalo može izravno priključiti na kabel.

Moderna tranzistorska tehnika omogućuje da se dobiju veliki ulazni otpori bez primjene specijalnih sklopova. FET-tranzistori (tranzistori s efektom polja) imaju veliki ulazni otpor, te je sklop s kondenzatorskim mikrofonom vrlo jednostavan.

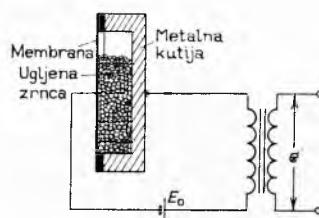
Nedostaci niskofrekvenčnih sklopova (vrlo visoke ulazne impedancije, potreba visokokvalitetne izolacije mikrofona, rešetke elektronike ili baze tranzistora, visoki polarizacioni napon zbog kojeg može doći do električnog probroja) ne postoji kod visokofrekvenčnog sklopa. Naprotiv, krug mikrofona je sasvim niske impedancije, pa nema problema izolacije, a kapsula mikrofona nalazi se na visokofrekventnom naponu od samo nekoliko volta.

U visokofrekvenčnim skloporima visokofrekventna struja modulira se promjenom kapaciteta mikrofona, koji je sastavni dio titrajnog kruga. Tonfrekventni signal dobiva se nakon demodulacije. Kondenzatorskim mikrofonom u visokofrekvenčnom sklopu može se prenositi i infrazučno područje.

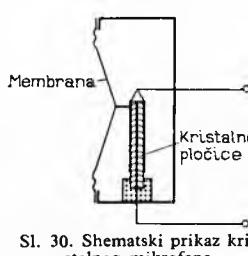
Elektromagnetski mikrofon.

Membrana ovog mikrofona (sl. 33) čvrsto je spojena s pločicom od nekog čelika koja se nalazi na maloj udaljenosti ispred polova permanentnog magneta. Kad membrana titra, mijenja se magnetski tok u magnetskom krugu. Stoga se u zavojnicu koja je namotana oko magneta inducira elektromotorna sila koja je i u ovom slučaju proporcionalna titrajuoj brzini. Ovi se mikrofoni primjenjuju u instalacijama hezbaterijskih telefona na brodovima i u rudnicima.

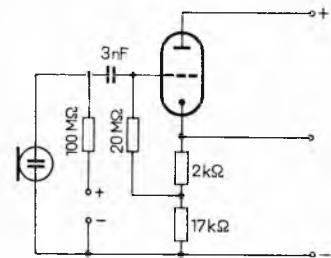
Elektrodinamički mikrofon proizvodi se u dvije bitno različite izvedbe: kao mikrofon s trakom i kao mikrofon s titrajnom zavojnicom. Princip rada u oba slučaja je isti. U vodiču (traci, zavojnici) koji je smješten u zračnom rasporu permanentnog magneta inducira se prilikom titranja elektromotorna sila $e = -B l v$. Budući da su magnetska indukcija B i duljina žice l za određeni tip mikrofona konstantne, elektromotorna je sila e upravno razmjerana titrajoj brzini v . U elektrodinamičkim mikrofonima s trakom nalazi se između polnih nastavaka permanentnog magneta valovito savijena metalna traka koja pri nailasku zvučnog vala titra u ritmu titraje brzine čestica zraka (sl. 34 a). Najrašireniji elektrodinamički mikrofoni jesu mikrofoni s titrajnom zavojnicom (sl. 34 b). Titrajni element ovog mikrofona je membrana na kojoj je nalijepljena zavojnica. Membrana vezana je s kućištem s pomoću elastičnih nabora. U ovoj zavojnici se



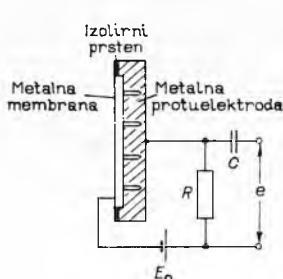
Sl. 29. Princip ugljenog mikrofona



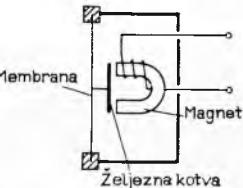
Sl. 30. Shematski prikaz kristalnog mikrofona



Sl. 32. Shema prepojačala za kondenzatorski mikrofon



Sl. 31. Princip kondenzatorskog mikrofona



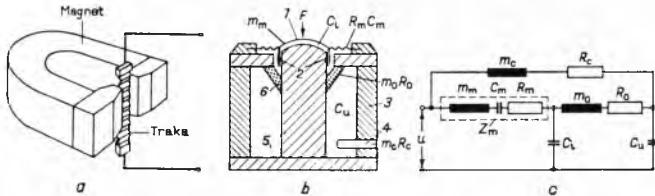
Sl. 33. Princip elektromagnetskog mikrofona

prilikom njezina titranja, kao što je to naprijed rečeno, inducira elektromotorna sila e .

Za mehanički sistem elektrodinamičkog mikrofona vrijedi da je $v = F/Z_m$, gdje F znači silu ($F = p S$), a Z_m mehaničku impedanciju membrane. Mehanička impedancija sastoji se od mehaničkog otpora R_m , mehaničke reaktancije mase membrane ωm_m i mehaničke reaktancije $1/\omega C_m$ sadržane u elastičnom učvršćenju membrane. Prema analogiji električnog i mehaničkog sistema s jednim stupnjem slobode dobiva se

$$v = \frac{F}{R_m + j(\omega m_m - \frac{1}{\omega C_m})}.$$

Oblik frekvencijske karakteristike titraje brzine ovisi o faktoru kvaliteta Q titrajnog sistema. Uz konstantan zvučni tlak koji djeluje na membranu mikrofona treba da je dobivena elektromotorna sila neovisna o frekvenciji, stoga i titraja brzina mora biti konstantna za područje konstantnog zvučnog tlaka. To se postiže ako je mehanički otpor R_m dovoljno velik, tj. ako je faktor kvaliteta Q dovoljno malen. Rezonantna frekvencija ne ovisi samo o mehaničkim konstantama membrane već i o obliku, tj. akustičkim svojstvima kućišta, tako da dobivamo vezani mehaničko-akustički titrajni sistem. Na sl. 34 b prikazan je presjek dinamičkog mikrofona, a na sl. 34 c njegova električna nadomjesna shema. Osnovni titrajni sistem tvore veličine m_m , R_m i C_m , tj. masa, mehanički otpor i elastičnost membrane. Međutim, rezon-



Sl. 34. Elektrodinamički mikrofon: a s trakom, b s titrajućom zavojnicom, c nadomjesna shema; 1 membrana, 2 zavojnica, 3 permanentni magnet, 4 cjevčica za prolaz zraka, 5 željezni dijelovi magnetskog kruga, 6 porozni materijal ili perforirana pregrada

nantna frekvencija membrane ne ovisi samo o tim mehaničkim konstantama, već i o zatvorenom unutrašnjem prostoru koji ima svoj određeni akustički kapacitet C_u . Krutost ovog volumena zraka djeluje naime u istom smislu kao i krutost učvršćenja membrane, tj. djeluje na smanjenje titraje brzine. Radi prigušenja titrajnog sistema odvaja se zatvoreni prostor od membrane perforiranim pregradom ili tekstilnim materijalom s određenim prigušnim otporom R_o i akustičkim induktivitetom m_o . Ispod sredine membrane i cilindričnog stupca magnetskog sistema jest mali prostor s akustičkim kapacitetom C_l , a cjevčica koja spaja unutrašnji prostor s vanjskim zrakom ima akustički induktivitet m_c i otpor R_c . Sve ove veličine sačinjavaju nekoliko titrajnih sistema koji su među sobom povezani. To su: slabo prigušen sistem m_m , R_m , C_m , C_l s rezonantnom frekvencijom između 6 i 7 kHz, jako prigušen sistem m_o , R_o , C_i , C_u , gdje se C_u može zanemariti, i sistem m_c , R_c , C_u . Nadomjesna shema pokazuje kako su među sobom povezani ti sistemi. Osnovnim titrajnim sistemom koji sačinjavaju m_m , C_m , R_m i R_o , m_o , C_u skida se rezonantno nadvišenje i postiže ravnomjerno prekrivanje područja srednjih frekvencija, titrajnim sistemom m_m , C_m , R_m , C_l proširuje se frekvencijsko područje mikrofona prema višim frekvencijama, a titrajnim sistemom m_c , R_c , C_u prema nižim frekvencijama.

Metode slične ovima koje su primijenjene u naprijed opisanom dinamičkom mikrofonu primjenjuju se za druge vrste mikrofona da bi se postigle što šire i što ravnije (horizontalnije) frekvencijske karakteristike.

Iz naprijed navedenog slijedi da pravolinijsku horizontalnu frekvencijsku karakteristiku mogu imati samo ugljeni, kristalni i kondenzatorski mikrofoni kad rade kao tlačni i ako im se rezonantna frekvencija titrajnog sistema nalazi iznad prenošenog područja, a elektrodinamički i elektromagnetski kad rade kao gradijentni, s rezonantnom frekvencijom sistema u području niskih frekvencija, ispod prenošenog područja.

Tehnička svojstva mikrofona. Osjetljivost mikrofona je kvocijent elektromotorne sile e na izlaznim priključnicama mikrofona i zvučnog tlaka p slobodnog zvučnog polja na mjestu mikrofona: $s = e/p$, a daje se u mV/μbar ili mV/(N/m²). Osjetljivost se može dati i u dB, i to u usporedbi sa zamišljenim mikrofonom koji pri jediničnom zvučnom tlaku ($p_0 = 1 \mu\text{bar} = 0,1 \text{ N/m}^2$) daje jediničnu elektromotornu силу $e_0 = 1 \text{ V}$:

$$s = 20 \lg \frac{s}{s_0} \text{ dB} = 20 \lg \frac{e}{e_0} \text{ dB}.$$

Efikasnost mikrofona. Mikrofon može se promatrati kao izvor električne energije koji napaja neki četveropol određene ulazne impedancije. Da bi se znalo kolika je snaga P_m nekog mikrofona što je on prenosi u slučaju pravilnog prilagodenja krugu na koji je priključen, ona se pri tlaku $p_0 = 1 \text{ N/m}^2 = 10 \mu\text{bar}$ uspoređuje sa zamišljenim mikrofonom snage $P_0 = 0,001 \text{ W}$. Ovaj odnos izražen u decibelim zove se efikasnost n . Pri pravilnom prilagodenju, kad je unutarnji otpor jednak opteretnom otporu R_t , snaga mikrofona iznosi:

$$P_m = \frac{e^2}{4 R_t} = \frac{e^2}{4 R_t} \cdot \frac{p^2}{p^2} = \left(\frac{e}{p} \right)^2 \frac{p^2}{4 R_t},$$

gdje izraz u zagradi znači osjetljivost mikrofona. Efikasnost iznosi

$$\begin{aligned} n &= 10 \lg \frac{P_m}{P_0} \text{ dB} = 10 \lg \frac{\left(\frac{e}{p} \right)^2 \cdot \frac{10^2}{4 R_t}}{10^{-3}} \text{ dB} \\ &= 10 \lg \left[\left(\frac{e}{p} \right)^2 \cdot \frac{1}{R_t} \cdot 25000 \right] \text{ dB} \\ &= \left(20 \lg \frac{e}{p} - 10 \lg R_t + 44 \right) \text{ dB}. \end{aligned}$$

Frekvencijska karakteristika mikrofona prikazuje ovisnost osjetljivosti mikrofona (u mV/μbar ili u dB) o frekvenciji. U jednom tipičnom slučaju eksperimentalno određena frekvencijska karakteristika pokazuje da se između 50 i 10 000 Hz osjetljivost mikrofona mijenja za najviše 5 dB. Iskustvo je pokazalo da pri prijenosu govora ili muzike uho ne primjećuje razlike osjetljivosti mikrofona manje od 2 dB.

Usmjerna karakteristika mikrofona. Prema obliku usmjerne karakteristike razlikuju se mikrofoni s kružnom, osmičastom i bubrežastom (kardioidnom) karakteristikom.

Prema namjeni odabire se mikrofon s određenom usmjerom karakteristikom. Kad je potrebno da mikrofon prima zvuk iz svih smjerova podjednako, treba uzeti mikrofon s kružnom karakteristikom, tj. tlačni mikrofon. Međutim, na višim frekvencijama ($f > 4000 \text{ Hz}$), kad su dimenzije mikrofona reda veličine valne duljine, i taj mikrofon postaje usmijeren i prima praktički samo iz malog prostornog kuta (v. sl. 28 a). Mikrofon s osmičastom karakteristikom (v. sl. 28 c) pogodan je, zbog jednakog osjetljivosti u dva suprotna smjera, za intervjuje, snimanje pjevača i klavira, itd. Mikrofoni s kardioidnom karakteristikom (sl. 28 d) prikladni su za eliminiranje buke publike, buke kamere iza mikrofona, ili se primjenjuju prilikom snimanja radi smanjenja utjecaja drugih izvora zvuka.

Harmoničko izobličenje. Budući da su pomaci membrane mikrofona relativno mali (od nekoliko μm do desetinki mm), nelinearnost titrajnog sistema nema nekog značajnog utjecaja, pa je stoga harmoničko izobličenje u mikrofonima (izuzev ugljenog) obično malo (< 1%).

Tranzijentno izobličenje. Neki mikrofoni prenose tranzijente (prelazne) signale naročito dobro. Tako npr. dinamički tračni mikrofon može prenijeti čak pravokutni zvučni signal. Ostali tipovi mikrofona nemaju takav odziv na tranzijente, pa u stanovitoj mjeri mijenjaju boju tonova instrumenata, a govoru daju poseban karakter. Mikrofoni s rezonantnom frekvencijom ispod radnog područja ističu tone niske frekvencije, mikrofoni s rezonantnom frekvencijom iznad radnog područja ističu visoke tone, a karakterizira ih dobra razumljivost i sonornost. Mikrofoni kojima rezonantna frekvencija leži u sredini radnog područja imaju svjetlu boju ali su im tranzijentna izobličenja nešto veća.

Naponi smetnji. Razinom parazitnog napona šuma koji se pojavljuje u mikrofonima određena je i najniža razina korisnog signala koji se još može prenijeti. Uzrok šumovima može biti vrlo različit. Najčešće ga treba tražiti u termičkom gibanju molekula zraka, atomâ u mehaničkom titrajućem sistemu i elektronâ u vodičima i radnim otporima, te u naponu šuma što ga uzrokuju prva elektronika ili prvi tranzistor u mikrofonskom krugu. Međutim, šumove izazivaju i transformatori, mehaničko potresanje, vjetar i uzdušne struje, a također elektromagnetska indukcija i radio-smetnje.

Impedancija mikrofona Z_m je onaj kompleksni unutarnji otpor što ga mikrofon pruža kao generator (izvor elektromotorne sile), a navodi se obično za frekvenciju 1000 Hz. Za mikrofone koji se priključuju na pojačalo preko transformatora uzima se impedancija koja se pojavljuje na priključcima sekundara tog prilagodnog transformatora. Prema svojoj impedanciji mikrofoni se dijele na mikrofone s niskom impedancijom ($10\cdots600 \Omega$) i mikrofone s visokom impedancijom ($25\,000\cdots80\,000 \Omega$).

Korisnost mikrofona veoma je mala zbog slabog prilagođenja akustičke impedancije zraka mehaničkoj impedanciji membrane i zbog dvostrukog pretvorbe energije (akustičke u mehaničku i mehaničke u električnu). Obično se kreće između 0,1 i 2%.

Zvučnici

Zvučnik je elektromehanički pretvarač koji električnu energiju posredstvom nekog mehaničkog sistema (npr. membranom) pretvara u akustičku energiju. Idealan zvučnik morao bi uz konstantnu prividenu električnu energiju proizvoditi konstantan zvučni tlak u cijelom čujnom frekvencijskom području od 20 do 20 000 Hz. To bi bio idealan širokopojasni zvučnik, koji je teško ostvariti. Zbog toga se obično za prekrivanje cijelog tog područja upotrebljava više zvučnika, od kojih neki prekrivaju samo donji dio frekvencijskog područja (niskotoniski zvučnici), drugi samo gornji dio tog područja (visokotoniski zvučnici, v. tabl. 6), a zvučnici za koje se ne traži velik kvalitet prekrivaju obično samo područje od 70 do $\sim 10\,000$ Hz. Kao mehanički sistem služi najčešće membrana, okrugla, ovalna ili pravokutna kruta ploha, ravna ili konična oblika, koja je na svojim vanjskim rubovima elastično učvršćena na držać, tzv. košaru, a unutarnjim rubom na centrorat. Membrana se može promatrati kao mehanički titrajni sistem s jednim stupnjem slobode (v. Akustika, TE 1, str. 57). Sila se prenosi na membranu ili u sredini, ili linjski, ili na cijeloj površini. Za pretvaranje električne energije (dobivene iz pojačala) u mehaničku energiju mogu se primijeniti gotovo sve poznate metode elektromehaničke transformacije energije. Međutim, danas se za tu svrhu u zvučnicima iskorištava najčešće elektrodinamički, elektromagnetski ili elektrostatički princip pretvorbe. Primjenjujući jedan od tih sistema pogona, pobuduje se membrana na titranje u ritmu tonskih frekvencija određenom silom koju stvara struja zvučnih frekvencija protječući kroz titrajnju zavojnici. Titranje membrane prenosi se na čestice okolnog zraka, pa time mehanički titraji membrane u njemu stvaraju zvučne valove. Sila koja djeluje na membranu mora pri tome svladavati tri vrste sile: inercijske sile (proporcionalne ubrzavanju), sile trenja (proporcionalne brzini titranja) i elastične sile (proporcionalne pomaku). Ove su sile na pojedinim mjestima frekvencijskog područja zvučnika različito izražene. Za sile inercije mjerodavna je ukupna masa membrane i zraka koji titra zajedno s njom, trenje uzrokovano je unutarnjim trenjem u sistemu membrane i trenjem čestica zraka. Samo je ovo posljednje korisno za ostvarivanje zvučnih valova. Veličina elastične sile ovisi o krutosti cijelog sistema.

Akustička impedancija zvučnika. Sili kojom membrana djeluje na zrak suprotstavlja se akustička impedancija zraka Z_{ak} koja se prema iznijetom sastoji od realnog i imaginarnog dijela:

$$Z_{ak} = R_s + j X_L.$$

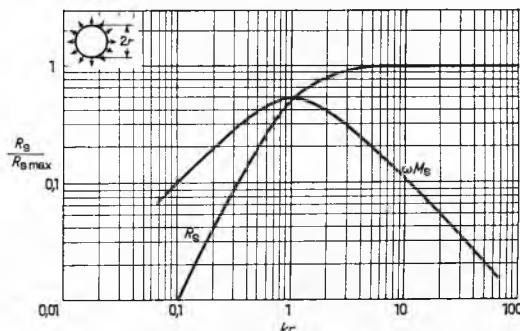
Realni dio, tzv. otpor zračenja R_s (uzrokovani trenjem čestica), mjerilo je za korisno isijavanje akustičke energije. On ovisi o djelatnoj površini S membrane i karakterističnoj akustičkoj impedanciji (valnom otporu) zraka:

$$R_s = S \cdot \rho_0 c.$$

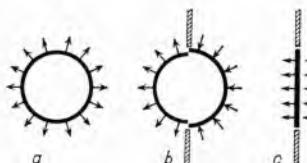
Imaginarni dio $X_L = \omega m_s$, uzrokovani inercijom mase zraka koji titra, pokazuje induktivni karakter.

Veličine realnog dijela R_s i imaginarnog dijela ωm_s akustičke impedancije dobivaju se matematičkim razmatranjem najjednostavnijeg zvučnog izvora, tzv. pulzirajuće kugle (v. str. 299 i Akustika, TE 1, str. 60), kojoj se polumjer sinusoidno periodski smanjuje i povećava. Kako je proračun tih veličina za pulzirajuću kuglu polumjera r složen, daju se ovdje samo rezultati. Otpor zračenja takva oscilatora iznosi: $R_s = 4\pi r^2 \rho_0 \cdot c$, a masa titrajućeg zraka jednaka je $m_s = 4\pi r^3 \rho_0$. U tim izrazima ρ_0 znači gustoću zraka, a c brzinu zvuka.

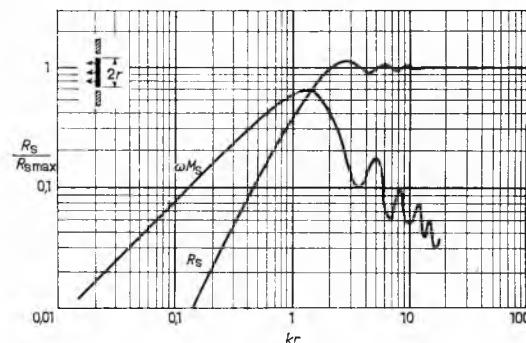
Takav se izvor zvuka u praksi jedva može ostvariti. Ali se ovi rezultati uz određene pretpostavke mogu primijeniti i na starnu membranu. Tok krivulje otpora isijavanja R_s i reaktancije ωm_s titrajuće mase zraka, u ovisnosti o omjeru između opsega plohe koja zrači i valne duljine, $k \cdot r$ ($k = 2\pi/\lambda$), prikazan je za pulzirajuću kuglu na sl. 35. Za određeni zvučnik umnožak $k \cdot r$ predstavlja frekvencijski ovisnu veličinu. Krivulje na sl. 35 ostaju



Sl. 35. Krivulja otpora isijavanja R_s i reaktancije titrajuće mase M_s u ovisnosti o $k r$ (omjera između opsega membrane i valne duljine) za pulzirajuću kuglu



Sl. 36. Različni izvori zvuka, a) Pulzirajuća kugla, b) protufazno pulzirajuće polukugle s pregradom, c) starnna membrana u pregradi



Sl. 37. Krivulja otpora isijavanja R_s i reaktancije titrajuće mase M_s u ovisnosti o $k r$ (omjera između opsega membrane i valne duljine) za starnne membrane

iste ako se između dviju polovica kugle stavi pregrada (sl. 36 a) ili ako polukugle titraju u protufazi (sl. 36 b), što približno predstavlja zvučnik. Umetne li se umjesto membrane starn (sl. 36 c), rezultati su veoma slični (sl. 37). U području viših frekvencija pojavljuju se na tim krivuljama udubljenja nastala interferencijom. Za starnnu membranu polumjera r iznose $R_s = 2\pi r^2 \rho_0 c$ i $m_s = 2\pi r^3 \rho_0$, a impedancija je

$$Z_{ak} = 2\pi^2 \rho_0 c \frac{\left(\frac{\omega}{c} r\right)^2 + \left(j \frac{\omega}{c} r\right)^2}{1 + \left(\frac{\omega}{c} r\right)^2} = Z_r + Z_j.$$

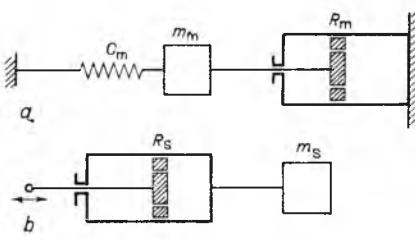
Ako je membrana mala u odnosu prema valnoj dulžini, iznosi $Z_r = 2\pi \rho_0 r^4 \omega^2/c$. Akustička snaga stapne membrane je $P_{ak} = \frac{1}{2} v^2 Z_r = \frac{1}{2} Z_r a^2 \omega^2$, gdje je v titrana brzina membrane, Z_r realni dio impedancije zvučnika i a amplituda membrane. Akustička snaga zvučnika ($P \sim v^2 R_s$) je iznad rezonantne frekvencije na nižim frekvencijama uglavnom konstantna jer se pod titrane brzine v kompenzira porastom otpora isijavanja R_s . Prema tome je linearno područje, tj. područje konstantnog tlaka, određeno rezonantnom frekvencijom i veličinom membrane. Npr. otpor isijavanja R_s zvučnika promjera ~ 15 cm postiže maksimalnu vrijednost pri frekvenciji ~ 1000 Hz ($r \geq \lambda/3$). Ispod rezonantne frekvencije pada isijavana snaga veoma naglo, ali ovisno o prigušenju. Iz toga je jasno da se zvučnik mora konstruirati tako da njegova rezonantna frekvencija leži na početku prenošenog područja.

Vrste zvučnika. Princip je rada pretvaračkog sistema u zvučnicima i mikrofonima isti. U principu svi bi mikrofoni mogli raditi i kao zvučnici, ali se isti element upotrebljava i kao mikrofon i kao zvučnik samo za specijalne svrhe s elektromagnetskim i elektrodinamičkim sistemima. Od pretvaračkih sistema opisanih kod mikrofona najčešće se primjenjuju dinamički, elektrostatički i piezoelektrični sistem; danas se najviše upotrebljavaju dinamički, elektrostatički i kristalni zvučnici.

Dinamički zvučnik. Na sl. 38 dan je presjek dinamičkog zvučnika. U zračnom rasporu između polnih nastavaka magneta nalazi se pomicna titrana zavojnica na koju je učvršćena konusna membrana. Proteže li kroz zavojnicu struja čujne frekvencije, pomicne se membrane u ritmu signala naprijed i natrag pod utjecajem aksijalne sile $F = B l i$, gdje je B magnetska indukcija u zračnom rasporu magneta, l duljina vodiča, a i struja kroz vodič. Budući da su B i l za određeni tip zvučnika nepromjenljive veličine, sila F ovisi samo o jakosti struje i ($F \sim i$). Dijelovi zvučnika jesu: membrana 7, titrana zavojnica 6, centralni magnet 1 (ili elektromagnet), meko željezo magnetskog kruga 2, 3 i 4 i košara 9. Izvedba membrane ovisi o namjeni zvučnika. Za visokotonske zvučnike upotrebljava se krući i lakši papir, a za niskotonske meksi i teži. Najvažnija su svojstva membrane krutost, težina i rezonantna frekvencija. Permanentni magnet je najskuplji dio zvučnika; izraduje se od Alnico i sličnih legura željeza ili od keramičkih magnetskih materijala (v. Elektrotehnički materijali). On treba da u zračnom rasporu stvori što veću magnetsku indukciju B . Danas postoje zvučnici koji imaju u rasporu magnetsku indukciju veću od 2 T (tesla). Titrana zavojnica izradena je od lakirane bakrene ili aluminijumske žice. Veoma je važno da je ona precizno izvedena.

Rad zvučnika razmotrit će se u nastavku na osnovi njegove električne nadomjesne sheme.

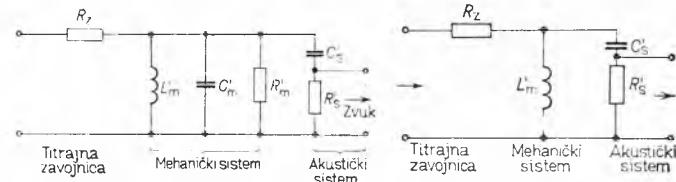
Membrana sa zavojnicom pričvršćena na košaru predstavlja *mehanički titrani sistem*. U tom sistemu označuje m_m masu membrane i zavojnice, $k = 1/C_m$ krutost membrane i R_m otpor trenja koji se pri pomicanju membrane pojavljuje u njenim rubovima. Taj je sistem prikazan s pomoću simbolâ na sl. 39 a.



Sl. 39. Simbolički prikaz membrane (a) i akustičkog otpora isijavanja R_s i mase zraka m_s koja titra zajedno s membranom (b)

Akustička impedancija zraka sastoji se od otpora isijavanja R_s koji je mjera korisne zvučne snage, i reaktancije što je uzrokuje masu zraka m_s koja titra zajedno s membranom. Taj akustički sistem titrajućeg zraka može se također prikazati simbolima (sl. 39 b) i to njegovom masom m_s i otporom trenja koji se pojavljuje među njegovim česticama, tzv. otporom isijavanja R_s .

Iz tih shema i omskog otpora titrane zavojnice R_z dobije se *električna nadomjesna shema zvučnika* (sl. 40). Da bi se s pomoću te sheme mogla izračunati električna impedancija cijelog sistema, treba mehaničke veličine prethodno pretvoriti u električne. Kao



Sl. 40. Električna nadomjesna shema dinamičkog zvučnika

Sl. 41. Električna nadomjesna shema dinamičkog zvučnika na niskim frekvencijama

vezu između jednih i drugih veličina služi zakon indukcije $u = B l v$, iz kojeg se dobije konstanta za preračunavanje $K = B l$. Uvrste li se u diferencijalne jednadžbe gibanja zvučnika za brzinu titranja v i za njezine derivacije odgovarajuće veličine napona u , dobiju se nakon sredenja izrazi za pojedine veličine kako slijedi:

$$L_m' = B^2 l^2 \cdot \frac{1}{S},$$

$$C_s' = \frac{1}{B^2 l^2 m_s},$$

$$C_m' = \frac{1}{B^2 l^2 m_m},$$

$$R_s' = B^2 l^2 \cdot \frac{1}{R_s},$$

$$R_m' = B^2 l^2 \cdot \frac{1}{R_m}.$$

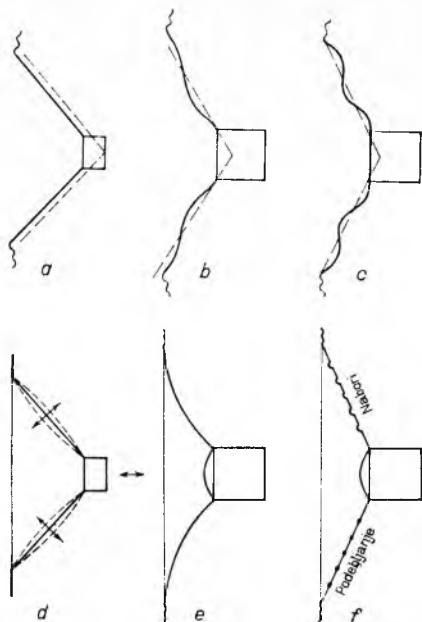
(B je magnetska indukcija u zračnom rasporu, R_z otpor zavojnice, a l duljina žice.) Impedancija (iz nadomjesne sheme) jest

$$\frac{U}{I} = R_z + \frac{1}{\left[\frac{R_m}{B^2 l^2} + \frac{j \omega m_s}{B^2 l^2} + \frac{1}{B^2 l^2 j \omega C_m} \right] + \frac{1}{B^2 l^2} \frac{1}{R_s} + \frac{1}{B^2 l^2 j \omega m_s}}.$$

Korisnost dinamičkog zvučnika (odnos akustičke snage P_a i električne snage P_e , $\eta = P_a/P_e$) ovisna je i o frekvencijskom području u kome zvučnik radi. U području niskih frekvencija mogu se R_m' i C_m' u odnosu prema L_m' zanemariti (sl. 41). Što je frekvencija niža to je reaktancija $\omega L_m'$ manja, a $1/\omega C_m'$ veće. Stoga se smanjenjem frekvencije struja koja teče kroz R_s smanjuje, a time se smanjuje i korisnost η . Pri višim frekvencijama također se korisnost smanjuje, ali je njezin pad u ovisnosti o frekvenciji blaži, jer membrana titra parcijalno, pa se time smanjuje masa m_m , a prema tome i C_m' . Najveći se dio električne energije troši u radnom otporu zavojnice. Otpor se zavojnice ne smije smanjiti ni time što bi se ona napravila od deblje žice ni time što bi se ona skratila, jer bi se radi povećanja debljine žice morao povećati zračni raspor u polju magneta, čime bi se smanjila magnetska indukcija u rasporu, a smanjenjem duljine l smanjila bi se sila $F = B l i$. Stoga se korisnost zvučnika može poboljšati jedino povećanjem magnetske indukcije B u rasporu. Da bi se povećala pri niskim frekvencijama, potrebno je da rezonantna frekvencija sistema ($\omega_0 = 1/\sqrt{m_m C_m}$) bude što niža, kako bi se povećala amplituda (a) a time i brzina titranja (jer je $v = a \omega$), dakle i akustička snaga ($P_a = \frac{1}{2} r^2 R_s$). Otpor isijavanja zvučnika R_s ne može se povećati. On postiže svoju najveću vrijednost tek kad polumjer zvučnika stoji prema valnoj duljini u odnosu $r/\lambda \geq 1/3$, npr. za $r = 12$ cm pri $f \approx 1000$ Hz.

Ako se izvodi zvučnik koji treba da prenosi šire područje frekvencija, javljaju se još i druge teškoće. Dosad se pretpostavljalo da membrana titra kao kruti stap. Međutim, na višim frekvencijama dolazi do uvijanja membrane (sl. 42 a ... d), što dovodi do međusobnog poništavanja djelovanja pojedinih njezinih di-

jelova (zbog različite faze). Dakle, veći zvučnik nije pogodan i za reprodukciju viših frekvencija ako se ne poduzmu posebne konstruktivne mjeru, kao što je upotreba tzv. Nawi-membrane (prema njem. nichtabwickelbar = nerazmotljiv, nerazvojan; sl. 42 e),



Sl. 42. Uvijanja konusne membrane i oblici membrane kojima se takva uvijanja sprečavaju. a: Konusna membrana pri normalnom radu na niskim frekvencijama, b: nepoželjna uvijanja pri višim frekvencijama, c: u uviđanja koja izazivaju potharmonike, d: Nawi-membrana, e: gore: membrana s nabojima, dolje: membrana s podebljajima

ili membrane s klinastim presjekom, ili membrane koja je pomoću nabora (ili dodatnim podebljajima) podijeljena na više prstena (sl. 42 f), ili upotreba zvučnika s dvije membrane, itd. Ako je moguće, najpovoljnije je upotrijebiti dva zvučnika od kojih svaki služi samo za određeno područje frekvencija. Takvi se zvučnici spašaju električnim skretnicama (v. str. 316).

Elektrostaticki zvučnik radi na principu privlačenja i odbijanja među električnim nabojima. On se danas izvodi samo u simetričnom obliku (sl. 43). Između dvije perforirane elektrode 1 nalazi se pomična vodljiva membrana 2. Na vanjske se elektrode dovodi preko transformatora tonfrekventni signal (signal frekvencije čujnog tona) trenutnog napona u , a na membranu istosmerni (polarizacijski) prednapon U . Na membranu djeluje sila

$$F \sim \frac{\left(U + \frac{u}{2}\right)^2}{d_1^2} - \frac{\left(U - \frac{u}{2}\right)^2}{d_2^2},$$

gdje su d_1 i d_2 razmaci između čvrstih elektroda i membrane. Da bi se održao linearni odnos između pobudne sile F i tonfrekventnog napona, treba između membrane i izvora polarizacionog napona staviti visokoomski otpor R ; tada vrijedi:

$$F \sim \frac{u Q}{d_1 + d_2}.$$

Budući da pobudna sila djeluje na membranu po cijeloj površini, membrana može biti lagana i imati veliku površinu. Masa membrane, koja je od metalizirane plastične folije, zanemarljiva je prema masi zraka koja titra zajedno s njom. Zbog dobrog prilagođenja membrane otporu zraka, mehaničko-akustička je korisnost η_{ma} elektrostatickog zvučnika dobra, ali je zato lošije prilagođenje na pojačalo, jer zvučnik je za pojačalo kapacitivno opterećenje.

Sl. 43. Shematski prikaz elektrostatickog zvučnika. 1: Fiksne perforirane elektrode, 2: membrana

Kristalni zvučnik radi na principu inverznog piezoelektričnog efekta. Pod utjecajem električnih nabroja koji se dovode na površinu piezoelektričnog kristala dolazi do mehaničkog savijanja kristala. Ti se pomaci prenose preko polužnog sistema na membranu. Kristalni se zvučnici primjenjuju jedino kao dodatni zvučnici za reprodukciju visokih tonova.

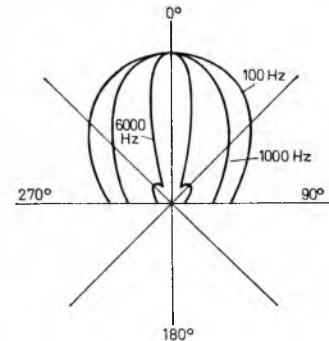
Ionomofon je zvučnik u kome kao membrane služe ionizirane čestice zraka. Čestice koje se nalaze u akustičkoj komori ioniziraju se zbog sudara molekulâ pobudnih termičkih kretanja u ultrazvučnom polju frekvencije ~ 27 MHz. Ionizirane se čestice dovode u titranje s pomoću elektrostatičkog polja koje se mijenja u ritmu tonske frekvencije. Titranje ioniziranih čestica prenosi se lijevkom na čestice vanjskog zraka. Sistem se obično izvodi s visokotoniskom i niskotoniskom jedinicom.

Osnovne karakteristike zvučnika. *Nominalna snaga zvučnika* je najveća snaga kojom se zvučnik može opteretiti bez opasnosti od uništenja, a uz određeno još dopustivo izobličenje. Dobar kvalitet reprodukcije dobiva se ako se zvučnik optereti jednom trećinom nominalne snage.

Reprodukcijska karakteristika zvučnika je kvocijent zvučnog tlaka ispred zvučnika na određenoj udaljenosti u smjeru njegove osi i napona na priključnicama zvučnika: $r = p/U$. Izražava se u $\mu\text{bar}/\text{V}$ ili u decibelima u odnosu prema reprodukciji zvučnika koji bi pri jediničnom naponu (1 V) dao jedinični zvučni tlak ($1 \mu\text{bar}$). Mjerenje treba vršiti u tzv. slobodnom polju, u kojem nema refleksije.

Frekvencijska karakteristika zvučnika je krivulja koja pokazuje ovisnost zvučnog tlaka o frekvenciji uz stalni napon na stezalkama zvučnika. Dozvoljeno odstupanje za kvalitetne zvučnike u prenoshenom frekvencijskom području iznosi ± 2 dB.

Usmjerena karakteristika zvučnika na niskim je frekvencijama kružna oblika, ali na višim frekvencijama dolazi do sve većeg usmjerjenja u pravcu osi zvučnika (sl. 44). To je posljedica razlike u duljini putova koje prelazi zvučni val od pojedinih dijelova membrane. Što je frekvencija viša i kut prema osi membrane veći, fazne su razlike veće. Ali na višim frekvencijama opet dolazi do pojačanog isijavanja u pojedinim smjerovima, jer razlike duljine puta postaju jednakе valno dužini.



Sl. 44. Usmjerena karakteristika zvučnika s konusnom membranom na različitim frekvencijama

Efikasnost zvučnika je omjer između zvučnog tlaka p koji proizvodi zvučnik na udaljenosti od 1 m u smjeru osi zvučnika i drugog korijena električne snage P mjerene na priključnicama zvučnika:

$$e = p/V\sqrt{P}, \text{ gdje je } P = U^2/Z.$$

Korisnost zvučnika η odnos je zračene akustičke snage P_a i utrošene električne snage P_e , $\eta = (P_a/P_e) \cdot 100\%$ i kreće se između 0,5 i 10%. Korisnost zvučnika jednaka je umnošku elektro-mehaničke korisnosti η_{em} i mehaničko-akustičke korisnosti η_{ma} : $\eta = \eta_{em} \eta_{ma}$.

Impedancija (električna) zvučnika važna je za pravilno priključivanje zvučnika na pojačalo. Impedancija dinamičkih zvučnika isključivo je niskoomska (4, 8, 16 Ω itd.). Ona se daje za frekvencije između 400 i 1000 Hz, jer su u tom području zvučni tlakovi najveći. Ovisnost impedancije dinamičkog zvučnika o frekvenciji prikazana je na sl. 47 b.

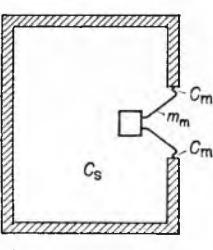
Izobličenja zvučnika mogu biti linearna, nelinearna i tranzientna. Nelinearna izobličenja nastaju zbog nelinearne karakteristike zvučnika pri većim pomacima membrane. Uzroci nelinearnosti jesu izlaženje titraje zavojnice iz homogenog magnetskog polja i nelinearne elastične sile. Kao posljedica toga nastaje harmoničko izobličenje i intermodulaciono izobličenje, koje smeta mnogo više nego harmoničko. Kod širokopojasnih zvučnika dolazi i do Dopplerovog efekta (frekvencijske modulacije) jer se istovremeno emitiraju niske i visoke frekvencije.

Za kvalitet zvučnika veoma je važan prijenos tranzijenata. Privede li se zvučniku pravokutni impuls (sl. 45 a), može se utvrditi da se izlazni impuls razlikuje od ulaznog. Sl. 45 b pokazuje reprodukciju tog impulsa s pomoću dinamičkog, a sl. 45 c s pomoću elektrostatičkog zvučnika. Do takvog izobličenja dolazi zbog tromosti membrane, vlastitih rezonancija i istiravanja nakon prestanka trajanja pobude. Upotreboom jakih magneta, kvalitetnom izvedbom membrane, te priključivanjem zvučnika na pojačalo malog izlaznog otpora i upotrebom više zvučnika za pojedina frekvencijska područja, ta se izbliženja mogu znatno smanjiti.

Ugradnja zvučnika. Isijavanje zvuka s obje strane zvučnika mora se razdvojiti jer je protufazno. Zvučni valovi koji nastaju s jedne strane membrane idu najkraćim putem oko zvučnika do druge strane membrane, gdje se zbog faznih razlika djelomično poništavaju valovima koji su nastali tam. Pri tome dolazi do tzv. akustičkog kratkog spoja i do slabljenja zvuka. Idealno rješenje bila bi ugradnja zvučnika u beskonačno veliki zid. U praksi se to postiže ugradnjom zvučnika u ozvučne ploče, u zatvorene i otvorene kutije, u akustički labirint, u kutije s bas-refleksom, u trubu, i sl. Svim tim mjerama produljuje se put zvučnih valova.

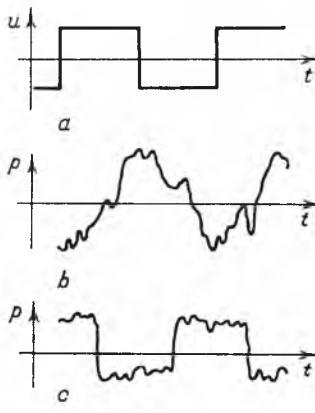
Ozvučne ploče. Sprečavanje akustičkog kratkog spoja ugradnjom zvučnika u ozvučne ploče (kvadratne ploče s rupom za zvučnik negdje blizu sredine) uspješno je do granične frekvencije f_g ; pri frekvencijama nižim od granične (zbog veće valne duljine) dolazi postepeno do sve jačeg međusobnog poništavanja prednjeg i stražnjeg zvučnog polja i do opadanja razine zvučnog tlaka za ~ 6 dB (20 lg 2) po oktavi. Granična frekvencija iznosi: $f_g = c/4d$ gdje d znači najmanji razmak između rubova zvučnika i ploče. Ako se, npr., želi da f_g bude 200 Hz, taj je razmak $d \approx 42$ cm. Tome odgovara valna duljina $\lambda \approx 1,7$ m. Vidi se da mora biti $d \geq \lambda/4$. Budući da ispod rezonantne frekvencije zvučnika razina zvučnog tlaka vrlo brzo opada (za 12 dB po oktavi), nema koristi od ugradnje zvučnika u ploču većeg d nego što odgovara toj frekvenciji. Zvučnik se ne smije ugradjivati u ploču simetrično, jer na pojedinim frekvencijama dolazi do jako izraženog minimuma. Slično djelovanje kao ploča ima *otvorena kutija*.

Zatvorene zvučne kutije (sl. 46) često se primjenjuju. Objе strane membrane akustički su odijeljene, pa nema akustičkog kratkog spoja; takva kutija djeluje, dakle, kao beskonačno velika ploča. Zračni jastuk u kutiji ima određenu krutost (recipročnu elastičnost) i povisuje rezonantnu frekvenciju zvučnika. Taj se nedostatak može, do određene granice, ukloniti povećanjem volumena kutije. U zatvorenoj kutiji dolazi do vlastitih rezonancija (stojnih valova), koje ovise o dimenzijama kutije i titranju zidova. Da se to ne bi odrazilo nepovoljno na svojstva kutije, njezine se stjenke oblažu materijalima koji apsorbuju zvuk (staklenom vunom, spužvom i sl.). Krutost zraka u kutiji ovisi o volumenu kutije i o površini membrane; ona je to veća što je kutija manja i što je membrana zvučnika veća.



Sl. 46. Zvučnik u zatvorenoj zvučničkoj kutiji

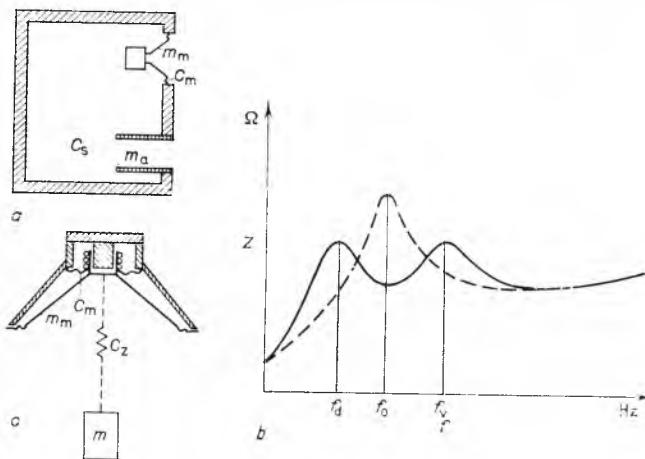
Kompresione kutije su specijalna izvedba zvučnih kutija s veoma dobrim svojstvima. Njihov je volumen znatno manji od volumena zatvorenih zvučnih kutija. Povećana krutost, koja se u vezi s time pojavljuje, kompenzira se manjim zvučnikom s mekim, tzv. akustičkim, ovešenjem membrane na košaru. U kompresionim kutijama krutost membrane praktički je određena zračnim jastukom. Da bi se dobila niska rezonantna frekvencija,



Sl. 45. Reprodukcija pravokutnog zvučnog impulsa (a) s pomoću dinamičkog (b) i elektrostatičkog zvučnika (c)

masu membrane valja povisiti, što se postiže pomoću težeg prstena na membrani. Prednosti su ovih kutija male dimenzije i dobro prenošenje tranzijenata, ali im je korisnost mala.

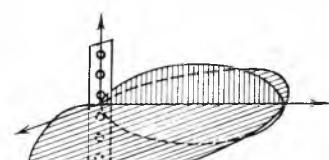
Kutija s bas-refleksom (sl. 47 a), ili kratko bas-refleks, zatvoren je kucište s cjevastim otvorom. Rezonantna frekvencija takvog sistema određena je krutošću zraka zatvorenog u kutiji i akustičkom masom zraka u cjevi (Helmholtzovog rezonatora). Ugraditi li se u takvu kutiju zvučnik, nastaje vezani sistem sličan pojasmom filtru. Ako sama kutija i sam zvučnički sistem imaju istu rezonantnu frekvenciju f_0 , dobiju se spajanjem tih dvaju sistema dva rezonantna nadvišenja, od kojih jedno, f_d , leži ispod, a drugo, f_v , iznad osnovne rezonantne frekvencije zvučnika i kutije (sl. 47 b). Crtkana krivulja pokazuje krivulju impedancije samog zvučnika, a puna krivulja impedanciju sistema. S pomoću kutije sa bas-refleksom postiže se pojačanje basova i ispod i iznad rezonantne frekvencije, a ujedno i sniženje rezonantnog nadvišenja. I ovdje su stjenke kutije iznutra obložene materijalom koji apsorbira zvuk. Djelovanje bas-refleksa objašnjava model na sl. 47 c. Krutost k opruge koja je spojena na membranu odgovara krutosti zraka u kutiji, a masa m masi zraka u cjevi. Pri višim frekvencijama (kad se membrana brzo pomiče) opruga sama apsorbira cijelu energiju i masa m u oscilacijama ne učestvuje. Pri



Sl. 47. Kutija s bas-refleksom. a Presjek kutije s ugrađenim zvučnikom, b tok krivulje impedancije Z u ovisnosti o frekvenciji za sam zvučnik (crtkano) i za cijeli sistem (puna linija), c model za objašnjenje djelovanja bas-refleksa

nižim frekvencijama počinje titrati i masa, zaostajući pri tome izu oscilacija membrane za određen fazni kut. Ako su svi dijelovi uskladeni, postiže se zadovoljavajuće poboljšanje frekvencijske karakteristike zvučnika.

Zvučni stup. Usmjerne karakteristike zvučnika ovise o obliku, veličini i konstrukciji membrane. Međutim, radi ekonomičnosti izvode se standardni oblici membrane, okrugli i ovalni, a željena usmjerena karakteristika dobiva se rasporedom većeg broja zvučnika u grupe. Ugrađivanjem više zvučnika u kutiju koja ima oblik vertikalno postavljenog stupa dobiva se u horizontalnoj ravni normalna karakteristika isijavanja, a u verticalnoj znatno sploštena (sl. 48). Taj je oblik karakteristike vrlo povoljan za ozvučavanje većih površina. Do povećane usmjerenosti zvuka pri primjeni više (n) zvučnika, postavljenih u vertikalnoj liniji jedan iznad drugog na međusobnoj udaljenosti d , dolazi zbog toga što zvučni valovi koje isijavaju pojedini zvučnici nisu na svim mjestima u prostoru u fazi. Stoga ni rezultirajuća jakost zvuka I_{rez} nije svadgje u prostoru jednak zbroju jakosti pojedinih zvučnika ($n \cdot I$, ako su jednaki), već je manja, a ponegdje je čak nula ako dolazi do potpunog međusobnog poništavanja valova. Ako se, npr., dva zvučnika postave jedan iznad drugog na udaljenosti d , na udaljenom će mjestu promatranja u smjeru a između



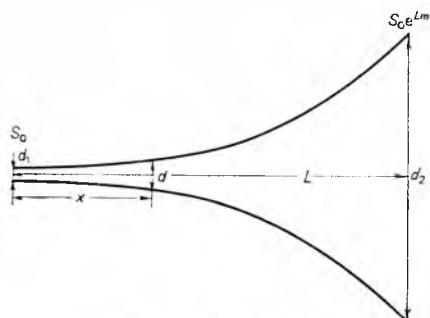
Sl. 48. Vertikalna i horizontalna usmjerena karakteristika zvučnog stupa

zvučnog vala jednog i drugog zvučnika postojati fazna razlika $\varphi = 2\pi b/\lambda = 2\pi d \cos a$. Za n zvučnika relativna jakost S u pojedinim smjerovima iznosiće

$$S = \frac{I_{\text{rez}}}{n I_0} = \frac{\sin \left(\frac{n \cdot 2\pi d}{\lambda} \cos a \right)}{n \sin \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \cos a \right)}.$$

Ako se S naneše kao radijusvektor na vertikalni polarni dijagram, dobije se vertikalna usmjerena karakteristika zvučnog stupa. Na izgled takva dijagrama imaju naravno utjecaj još i refleksije zvuka od površine zemlje i vjetra. Što je veći broj zvučnika to je karakteristika u vertikalnoj ravnini usmjerena. Pravilnim nagibom i smještajem zvučnog stupa može se postići idealno ozvučenje određene površine. Zakretanjem zvučnika u stupu jednog prema drugom za mali kut smanjuje se prevelika usmjerenoost na višim frekvencijama. Ako se želi usmjereno zračenje postići u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini, upotrebljavaju se zvučne grupe, tj. postavlja se veći broj zvučnih stupova jedan do drugoga.

Eksponencijalna truba. Mala korisnost zvučnika uglavnom je rezultat lošeg prilagođenja velike impedancije mehaničkog titrajnog sistema membrane maloj akustičkoj impedanciji zraka. [Akustička impedancija zraka iznosi $Z_{\text{zr}} = R_s + jX_{\text{zr}}$, gdje R_s znači otpor zračenja ($R_s = S \rho_0 c$), a X_{zr} reaktanciju zračne mase koja djeluje kao induktivitet.] S pomoću trube može se prilagođenje malih membrana na impedanciju zraka poboljšati, a time se postiže zračenje veće snage i, prema tome, i bolja korisnost (čak i do 50%). Najbolji se rezultati postižu tzv. eksponencijalnom



Sl. 49. Eksponencijalna truba

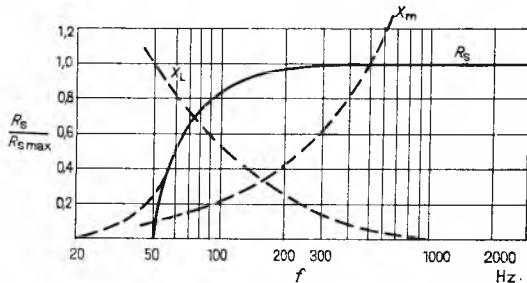
trubom, koja je konstruirana tako da se za jednake priraste duljine površina presjeka povećava za isti postotak (sl. 49). Površina presjeka S na bilo kojoj udaljenosti x od njezina grla iznosi:

$$S = S_0 \cdot e^{mx},$$

gdje S_0 znači površinu presjeka pri grlu, a m konstantu proširenja presjeka. Međutim, manja je ovakvih truba da niske frekvencije prenose tek počevši od neke odredene, tzv. granične frekvencije, koja iznosi:

$$f_g = \frac{c}{4\pi m},$$

što je s pomoću otpora zračenja R_g prikazano na sl. 50. Prema tome, truba povećava korisnost zvučnika u području srednjih frekvencija, ali ispod granične frekvencije uopće ne isijava. Donja



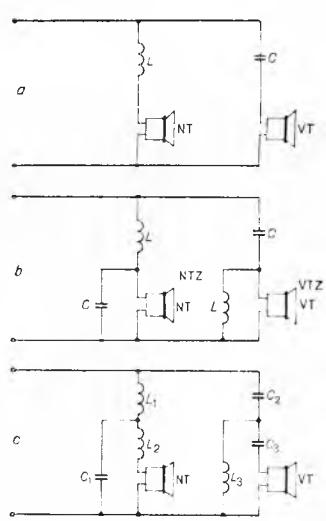
Sl. 50. Krivulja otpora isijavanja R_g , reaktancije mase zraka X_L i mase membrane X_m u ovisnosti o frekvenciji, za zvučnik ugrađen u eksponencijalnu trubu

granična frekvencija treba da se poklapa s rezonantnom frekvencijom zvučnika. Radi kompenzacije reaktancije zračne mase X_{zr} (koja ima induktivni karakter), i time daljeg poboljšanja korisnosti, uzimaju se za tu svrhu tvrde membrane ili se odstran na membranu stavlja zatvorena tlačna komora (koja djeluje kapacitivno).

Da bi se uz što manju fizičku duljinu zvučnika s trubom postigla dovoljno niska donja granična frekvencija, zvučnici se izvode sa savinutom eksponencijalnom trubom. Na sl. 51 prikazan je presjek savinute trube u kojoj se nalazi širokopojasni zvučnik. Da bi se izbjeglo izobličenje visih frekvencija, truba prenosi samo područje od 30 do 500 Hz, što se postiže niskopropusnim akustičkim filtrom (volumen i otvor). Područje srednjih i visokih frekvencija prenosi se direktno preko membrane. Osim navedene, postoje i niz drugih izvedaba zvučnika sa zavinutom trubom.

Reprodukcijski širokog zvučnog područja. Teško je izvesti širokopojasni zvučnik koji bi zadovoljio u cijelom akustičkom području. Osim toga, kod njega se pojavljuju intermodulacijska izobličenja, Dopplerov efekt i amplitudna modulacija. Rješenje problema vjerne reprodukcije zvuka i pored tih nedostataka zvučnika jest upotreba zvučničkih kombinacija u kojima svaki zvučnik radi u onom frekvencijskom području za koje je predviđen. To se odjeljivanje obavlja električnim skretnicama, visokim i niskim propustima koji imaju, ovisno o broju elemenata, nagib 6, 12 i 18 dB po oktavi (sl. 52). U tabl. 6 navedena su frekvencijska područja pojedinih zvučnika u slučaju primjene kombinacija dvaju ili triju zvučnika.

Sve kutije i ploče zvučnika treba da budu izvedene od čvrstog materijala koji prigušuje vlastite oscilacije. Takvi su materijali: deblje drvene daske, panel-ploče, šper-ploče, gips i plastike.



Sl. 52. Filtarske električne skretnice za spajanje visokotonoskog (VT) i niskotonoskog (NT) zvučnika za gušenje od točke prekllopne frekvencije: a za 6 dB po oktavi, b za 12 dB po oktavi, c za 18 dB po oktavi

Tablica 6
RASPORED FREKVENCIJSKIH PODRUČJA PRI PRIMJENI ZVUČNIČKIH KOMBINACIJA

Kombinacija	Područje		
	I	II	III
sa 3 zvučnika sa 2 zvučnika	20...250 Hz 20...500 Hz ili 20...5000 Hz	250...5000 Hz 500...15000 Hz ili 5000...15000 Hz	5...15 kHz

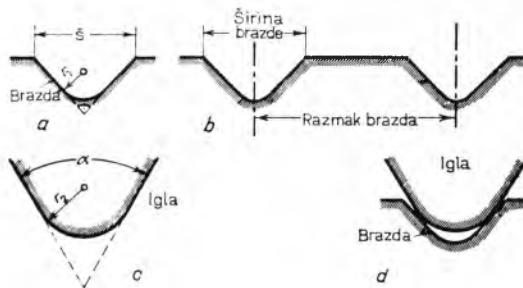
Slušalice. Svi principi rada koji se primjenjuju kod zvučnika mogu se primjeniti i na slušalice. Slušalice se najviše upotrebljavaju u telefoniji. Telefonske slušalice rade na elektromagnetskom principu i njima se ne postavljaju veći zahtjevi u pogledu kvaliteta reprodukcije. Za kvalitetniju reprodukciju primjenjuju se kristalne slušalice, a naročito dinamičke.

Snimanje i reprodukcija gramofonskih ploča

Snimanje i reprodukcija zvuka s pomoću gramofonskih ploča provodi se načelno ovako: zvuk (govor, glazba) se s pomoću mikrofona pretvara u odgovarajuće tonfrekventne struje koje se nakon pojačanja dovode elektromehaničkom pretvaraču, *glavi*

za snimanje. Nož koji se nalazi u glavi za snimanje pokreće se silom generiranom u svitku kroz koji protječe struja. Amplitudne kretanja i brzina titranja noža su proporcionalne sa amplitudama i brzini čestica zvučnog vala. Nož urezuje na rotirajućoj ploči — koja se nekad pravila od voska, plastike ili šelaka, a danas isključivo od aluminijuma prevučena nitroceluloznim lakom — spiralnu brazdu moduliranu uslijed toga što nož titra okomito na brazdu u ritmu zvučnih valova primljenih mikrofonom. Pri reprodukciji, igla mehaničko-električnog pretvarača, tzv. *zvučnice*, slijedi moduliranu brazdu i pomiče se u ritmu snimljenih titraja. Zvučnica ima zadaću da pomake igle pretvoriti u električnu struju ili napon, koji se u pojačalu pojačava i dovodi zvučniku.

Brazde i igle. Brazda se sastoji od dvije kose stijenke (tzv. bokova), koje zatvaraju kut od $\sim 90^\circ$, i zaokruženog dna (sl. 53 a). U toku vremena mijenjale su se dimenzije brazda (širina δ i polumjer zakrivljenosti dna, r_1). Danas se razlikuju široke («normalne») brazde, mikro-brazde (uske), mikro-brazde za stereo-ploče i pikobrazde. Široke brazde urezaju se od 1947 samo na ploče sa 78 o/min koje služe za mehaničko-akustičko sviranje. Mikro-brazde služe za ploče sa 45 i 33 $\frac{1}{2}$ o/min; mikro-brazde za stereo-ploče nešto malo od njih odstupaju. Piko-brazde primjenjuju se vrlo rijetko, samo za ploče sa 16 $\frac{2}{3}$ o/min. Prilikom reprodukcije, igla — nekad čelična, danas samo od safira ili dijamanta — klizi po brazdi. Igle su s donje strane kuglasto zaobljene (polumjer zaobljenja r_2 ; sl. 53 c). Iglu vode bokovi brazde, ona ne smije dodirivati dno brazde. Pravilan položaj igle pokazuje sl. 53 d.



Sl. 53. Oblik brazda i igle za reprodukciju zvuka s gramofonskim pločama

Preporuča se iglu nakon 50...100 sati rada kontrolirati i, ako je potrebno, promijeniti, jer istrošena igla ošteće ploču. Uz pažljivu upotrebu igla može trajati i do 600 sati. Širina brazde δ , polumjer zakrivljenosti dna brazde r_1 i polumjer zaobljenja igle r_2 standardizirani su za pojedine vrste brazda (tabl. 7). Razmak brazdi (sl. 53 b) nije standardiziran.

Na gramofonske ploče odnose se jugoslavenski standardi JUS N. N 4.200 (opći pojmovi i definicije), JUS N. N 4201 (mjere i karakteristike) i JUS N. N 4202 (uredaji za reprodukciju zvuka s ploča).

Tablica 7

DIMENZIJE BRAZDA GRAMOFONSKIH PLOČA I IGALA

Vrsta brazde	Dimenzije brazde		Dimenzije igle	
	Širina δ , μm	Polumjer r_1 , zakrivljenosti dna, μm	Polumjer r_2 , zaobljenosti vrha, μm	Kut vrha
Široka	~ 130	25	$60 \dots 65, \pm 5$	$40 \dots 55^\circ$
Uska mikro	≥ 55	$\leq 7,5$	25 ± 5	$40 \dots 55^\circ$
Uska stereo	40	≥ 4	15 ± 3	2
Uska piko	40	3	8	

Biradijalna igla (igla eliptičnog presjeka) ima polumjere $r_2 = 6 \dots 20 \mu\text{m}$

Karakteristike gramofonskih ploča. Danas se proizvode gramofonske ploče s ovim standardiziranim promjerima i brzinama vrtnje: 300 i 250 mm s normalnom brazdom i 78 o/min, 300 i 250 mm s mikro-brazdom i 33 $\frac{1}{2}$ o/min, 175 mm s mikro-brazdom i 45 o/min. Stereo-ploče proizvode se većinom s promjerom 30 i 25 cm sa 33 $\frac{1}{2}$ o/min i 175 mm sa 45 o/min. Za reprodukciju govora upotrebljavaju se ponekad i ploče sa 16 $\frac{2}{3}$

o/min. U Americi se vrše pokusi s pločama sa brzinom vrtnje 8 $\frac{1}{2}$ o/min.

Vrijeme sviranja ploče T je uz danu dinamiku i određeno frekvencijsko područje dakako to dulje što je polumjer ploče veći, što se površina ploče može bolje iskoristiti (smanjenjem razmaka među brazdama i smanjenjem polumjera posljednje unutarnje brazde) i što je brzina vrtnje manja:

$$T = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{n d}.$$

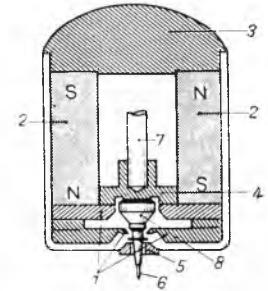
(R_{\max} je polumjer vanjske brazde, R_{\min} polumjer unutrašnje brazde, d razmak između sredina brazda, n brzina vrtnje.) Ploča s normalnom brazdom (78 o/min) ima uz promjer 300 mm vrijeme sviranja 5 min, uz promjer 250 mm 3,7 min, ploča s mikro-brazdom, promjerom 175 m i 45 o/min ima vrijeme sviranja ~ 6 min, s promjerom 300 mm i 33 $\frac{1}{2}$ o/min ~ 25 min. Ploča s promjerom 300 mm, brzinom vrtnje 16 $\frac{2}{3}$ o/min i piko-brazdom imala bi vrijeme sviranja 110 min, ista ploča s promjerom 175 mm, ~ 50 min.

Snimanje zvuka na ploče. Postoje dva načina urezivanja brazde: dubinsko i bočno urezivanje (dubinski i bočni rez). Pri dubinskom urezivanju (T. A. Edison 1877) mijenja se širina i dubina brazde u ritmu zvučnog vala, a pri bočnom urezivanju (E. Berliner 1887), koje se danas isključivo primjenjuje za obične jednokanalne ploče (tzv. mono-ploče), nož za urezivanje brazde titra horizontalno u ritmu zvučnog signala i urezuje vijugavu spiralnu brazdu kojoj se dubina ne mijenja. Uvođenjem stereofonskog snimanja (1931) dubinski rez je opet došao u upotrebu. Pri tom snimanju zvuk se registrica moduliranjem brazde u dvije ravnine okomite jedna na drugoj, bilo tako da se za jedan kanal urezuje dubinska a za drugi bočna brazda, bilo tako da sile kojima se urezuju modulacije brazde imaju jednu horizontalnu (bočnu) i jednu vertikalnu (dubinsku) komponentu.

Urezivanje brazde. Brazda se nožem koji se nalazi na glavi za snimanje (urezivaču) urezuje u ploču koja se okreće. Glava za snimanje se uz pomoć posebnog mehanizma pomiče radikalno od ruba ploče prema sredini, a nož titra okomito na brazdu koju urezuje. Da bi se površina ploče bolje iskoristila, razmak se među brazdama s pomoću elektroničkog upravljačkog sistema automatski mijenja tako da je veći kad je amplituda titranja noža veća, a manji kad je amplituda manja. Na taj se način postiže 30...40 % bolje iskorištenje površine ploče nego uz stalni razmak među brazdama.

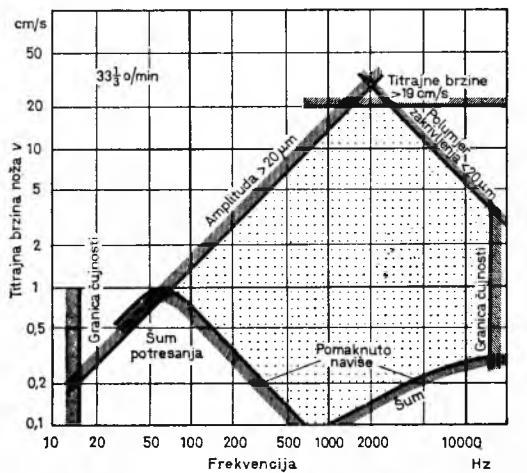
Glava za urezivanje radi na elektromagnetskom ili na elektrodinamičkom principu. Na sl. 54 prikazana je moderna jednokanalna elektrodinamička glava za urezivanje. Na donjem kraju njezinog pomičnog dijela nalazi se trobridni nož sa safirnim ili dijamantnim vrškom. Da bi se prilikom urezivanja smanjio mehanički otpor materijala i dobila čistiju i glaću brazdu (što smanjuje i šum), nož se električnim putem grije. (Za dvokanalno urezivanje brazde v. poglavље Stereofonija u ovom članku.)

Frekvencijska karakteristika urezivanja. Kako je već rečeno, brzina titranja noža pri urezivanju brazde proporcionalna je brzini titranja čestica zraka. Mnoge zvučnice pri reprodukciji zvuka s gramofonskim pločama daju izlazni napon koji je također proporcionalan titrajanju brzini (zraka i noža pri snimanju, a igle kasnije pri reprodukciji). Prema tome izgleda da bi se dobila najkvalitetnija reprodukcija kad bi brzina noža bila u cijelom opsegu reproduciranih frekvencija jednaka brzini čestice zraka. To bi se postiglo kad bi se snimalo konstantnom titrajanjom brzinom noža, tj., budući da za titrajnu brzinu vrijedi jednadžba $v = a\omega$ (jedn. 6; a je amplituda noža), kad bi se samo mijenjala amplituda noža obrnuto proporcionalno frekvenciji. Međutim, kad bi se tako postupilo, na niskim bi frekvencijama amplitude noža bile



Sl. 54. Jednokanalni elektrodinamički urezivač brazde. 1. Polni nastavci, 2. permanentni magnet, 3. željezo magnetskog kruga, 4. držać sistema igle, 5. prsten od mekog željeza, 6. trobridni nož za urezivanje brazde, 7. držać, 8. glava

velike i razmak između brazdā vrlo širok, pa bi se zbog velike utrošene površine ploče smanjilo vrijeme sviranja, a na visokim frekvencijama amplitude bi noža bile vrlo male i pale čak ispod razine šuma uzrokovanih zrnatom strukturom materijala ploče. Stoga se pri snimanju ploče ne primjenjuje jednolična frekvencijska karakteristika urezivanja, nego se u toku snimanja povećavaju amplitude titrajima viših frekvencija, a smanjuju amplitude titrajima nižih frekvencija time što se na nižim frekvencijama smanjuje, a na višim frekvencijama povećava titrana brzina noža. No titrana brzina noža ne smije na niskim frekvencijama biti ni premašiti, jer bi onda amplitude noža postale manje od amplituda šumova smetnje pri reprodukciji uslijed potresanja motora, niti smije na višim frekvencijama biti prevelika, jer, s jedne strane, veličina je amplitude koju nož može glatko urezati ograničena njegovim oblikom, i, s druge strane, zavoji modulacija brazde pri velikim amplitudama imaju tako mali polumjer zakrivljenosti da ih igla pri reprodukciji (naročito u brazdama najbližim središtu ploče) ne može slijediti. Sl. 55 pokazuje u ovisnosti o frekvenciji, u dvostruku logaritamskom mjerilu, granice titrane brzine noža pri urezivanju mikro-brazde u ploču s brzinom vrtanje $33\frac{1}{2}$ o/min.



Sl. 55. Granice titrane brzine noža pri urezivanju mikro-brazde

Maksimalna amplituda titranja noža uzeta za takvu ploču iznosi $20 \mu\text{m}$. Jednadžba $v = a\omega$ za $a = \text{konst.}$ prikazana je u logaritamskoj anamorfizi pravcem koji ide pod 45° slijeva dolje nadlesno gore. Titrana brzina iznad tog pravca davaće bi amplitude $> 20 \mu\text{m}$. Titrana brzina šumova potresanja na srednjim frekvencijama obrnuto je razmjerna frekvenciji, njihova frekvencijska ovisnost prikazana je, prema tome, u dijagramu pravcem koji ide pod 45° zdesna dolje nalijevo gore. Titrana brzina noža ispod tog pravca ide bi amplitude manje od amplitude šuma. Titrana brzina pri kojoj nož upravo još može brazdu glatko rezati izračunava se (iz dimenzija noža, brzine vrtnje ploče i polumjera unutarnje brazde) da je u ovom slučaju (neovisno o frekvenciji titranja noža) 19 cm/s . Polumjer zakrivljenja zavojia mikro-brazde koji igla pri reprodukciji može upravo još slijediti iznosi $20 \mu\text{m}$. Titrana brzina koja daje takve zavoe (amplitudo) ovisna je o brzini vrtnje i polumjeru unutrašnje brazde; obrnuto je razmjerna frekvenciji, prikazana je dakle u sl. 55 pravcem koji ide zdesna dolje nalijevo gore. Titrana brzina noža iznad tog pravca davaće bi zavoe premalog polumjera zakrivljenja.

Smanjenje i povećanje amplitude urezivanja mora se prilikom reprodukcije korigirati u zvučnici ili pojačalu. Da bi se svaka ploča na svakom gramofonu mogla ispravno reproducirati, međunarodnim preporukama i nacionalnim standardima određene su krivulje (frekvencije) urezivanja. Prema jugoslavenskom standardu JUS N. N4.201 karakteristika urezivanja prikazana je jednadžbom izrađenom u skladu s preporukama međunarodne komisije IEC:

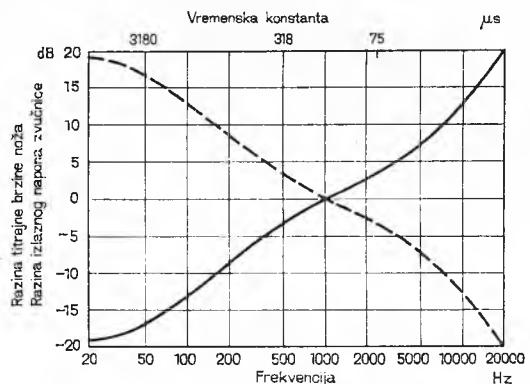
$$v = 10 \log \left(1 + 4 \pi^2 f^2 t_1^2 \right) - 10 \log \left[1 + \frac{1}{4 \pi^2 f^2 t_2^2} \right] + \\ + 10 \log \left(1 + \frac{1}{4 \pi^2 f^2 t_3^2} \right),$$

gdje je v relativna titrana brzina u dB, f frekvencija u Hz, a t_1 , t_2 i t_3 vremenske konstante koje imaju vrijednosti 50, 450 i $3180 \mu\text{s}$ za široku brazdu, a 75, 318 i $3180 \mu\text{s}$ za mikro-brazdu.

Propisana frekvencijska karakteristika titrane brzine pri urezivanju uz konstantan napon na zvučnici predstavlja, dakle, kombinaciju karakteristika admitancije analognih ovisnosti triju RC-spojeva, i to: paralelnog spoja otpora

i kapaciteta s vremenskom konstantom t_1 , serijskog spoja otpora i kapaciteta s vremenskom konstantom t_2 i serijskog spoja kapaciteta i otpora s vremenskom konstantom t_3 .

Sl. 56 prikazuje krivulju urezivanja za mikro-brazdu, prema spomenutom standardu. Tolerancija te krivulje u području od



Sl. 56. Krivulja urezivanja i krivulja reprodukcije gramofonske ploče prema JUS N. N4.201

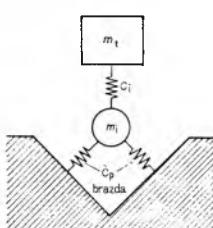
50 Hz do 10 kHz, u odnosu prema frekvenciji 1000 Hz, iznosi $\pm 2 \text{ dB}$.

Proizvodnja gramofonskih ploča sastoje se od snimanja zvuka, urezivanja brazde, galvanoplastičke izrade matrice i prešanja ploča. U akustički posebno obrađenoj prostoriji u kojoj se snima govor ili glazbu (studiju) mikrofon pretvaraaju zvučne titrare u električne; ovi se titrari reguliraju na rezljivom stolu, snabdevjenu većim brojem mikrofonskih ulaza koji se mogu po volji „mjeseći“, nadalje korektorima frekvencijskih karakteristika, limiter-kompresorima, umjetnim odjekom (uredajem za povećanje odjeka), a zatim zapisuju po grupama zvukova na višekanalnom magnetofonu. Na uredaju za urezivanje brazde u tak ploče signali na magnetofonskoj traci pretvaraju se u oscilacije električnog napona, a ove u mehaničke titrare noža za urezivanje. Od ploče s urezanom brazdom napravi se galvanoplastičkim putem vjerni negativ lak-ploče, niklena matrica, zvana „otac“. Na njoj su urezane brazde izbočene. Sličnim postupkom dobiva se s pomoću matrice „otac“ pozitiv zvan „majka“, koji nakon audio-vizuelne kontrole i eventualnog dotjerivanja predstavlja prototip jedne strane ploče, od kojeg se — opet galvanoplastičkim putem — dobiva potreban broj negativnih, kromiranih alata za prešanje ploča, zvanih „sin“. Prije posljednje obrade te se matrice za prešanje na posebnom uredaju kontroliraju s pomoću zrakâ radioaktivnog stroncijuma. Za jednu gramofonsku ploču potrebne su dvije matrice, jedna za svaku stranu. S pomoću njih se u prešama proizvode ploče tiskanjem granula termoplastičnog materijala na bazi polivinilklorida. Proizvodnja ploča kontrolira se statistički metodom uzorka. U novije vrijeme proizvode se ploče i brzganjem plastične mase.

Reprodukcijski zvukovi s gramofonskih ploča provodi se specijalnim mehaničko-električnim pretvaračima, tzv. zvučnicama. Igla koja klizi po vijugavoj brazdi ploče prenosi mehaničke titrare na pretvarački sistem zvučnice, gdje se oni pretvaraju u pripadnu elektromotornu silu. Prema fizikalnom principu na kome radi pretvarač, zvučnice se dijele na kristalne i keramičke (koje rade na principu piezoelektričnog efekta), na elektrodinamičke i elektromagnetske, na poluvodičke, kapacitivne i fotoelektrične. Posljednje tri vrste zvučnica u nas se rijetko primjenjuju.

Zvučnica treba da ima što šire frekvencijsko područje, što viši izlazni napon, malo izobličenje i slabo akustičko zračenje.

Pritisak igle — koja je najčešće od safira ili dijamanta — treba da bude malen. Ipak mora postojati neki minimalni pritisak, radi dobrog vodenja ručke po ploči i nalijeganja igle u brazdi. Na sl. 57 data je mehanička nadomjesna shema tonske ručke, igle i ploče. Iz nje se vidi da ti elementi sačinjavaju titrane sisteme. Zbog pojave rezonancije u tim sistemima, titrari igle postaju veći, tj. nastupa rezonantno nadvišenje, što iskrivljuje frekvencijsku karakteristiku reprodukcije, tj. propisanu ovisnost izlaznog napona od frekvencije. Mehanička rezonancija pojavljuje se u zvučnicama u dva područja frekvencijskog opsega: jedno (*gornje rezonantno nadvišenje*) pojavljuje se na visokim frekvencijama oko frekvencije $f_p \approx 1/(2\pi\sqrt{m_i C_p})$, (gdje je C_p elastičnost materijala ploče, a m_i efektivna masa igle koja djeluje u brazdi), a drugo (*dolje rezonantno nadvišenje*) na niskim frekvencijama oko frekvencije $f_t \approx 1/(2\pi\sqrt{m_t C_i})$, (gdje je m_t efektivna masa tonske ručke koja



Sl. 57. Mehanička nadomjesna shema tonske ručke

se očituje na mjestu igle, a C_i elastičnost igle). Dobre se zvučnice konstruiraju tako da gornje rezonantno nadvišenje pada iznad 20 kHz, a donje ispod 50 Hz, tj. da rezonantna nadvišenja padaju iznad i ispod granica prijenosa.

Korekciju frekvencijske karakteristike, ako se radi o magnetskoj ili dinamičkoj zvučnici, valja izvršiti u korekcionom prepočačalu. Kod piezoelektričkih zvučnica korekcija je izvedena u samom sistemu upotreboom povoljnijih materijala, oblikom i konstrukcijom.

Frekvencijska karakteristika mora se korigirati tako da — u granicama tolerancije — odgovara standardiziranoj krivulji reprodukcije; ova prikazuje takvu ovisnost izlaznog napona zvučnice o frekvenciji da se njome ispravlja nelinearnost karakteristike urezivanja brazde. Kako se vidi iz sl. 56, ta je krivulja aksijalno simetrična krivulji urezivanja.

Kristalne zvučnice rade na principu piezoelektričnog efekta. Element ove zvučnice sastavljen je od pločica izrezanih iz kristala Seignetteove soli. Specijalnim postupkom rezanja žicom dobivaju se iz monokristalnog bloka pločice debeljine 0,25...0,3 mm, koje se vodljivim kontaktnim materijalom lijepe jedna do druge. Priključci elementa izvedeni su od srebrne folije. Jedan se priključak nalazi u sredini između (obično) dvije pločice, a drugim su medusobno spojene krajnje vanjske površine pločića kristala. Element se zaštićuje posebnim lakom od atmosferskih utjecaja.

Kristalni element je torzionalni pretvarač, tj. pri torzionom savijanju pojavljuje se napon na izvodima. Kristal je pomoću ležaja od meke plastične mase (polivinilklorida) pričvršćen na kućište (v. sl. 104). Linearni pomaci igle prenose se preko nosača igle na spojni element, koji ih pretvara u torzionalne titraje. Korekcija karakteristike urezivanja izvodi se u zvučnici. Kristalna zvučnica daje napon od 1 do 3 V, kod $v_0 = 14 \text{ cm/s}$ i $f = 1000 \text{ Hz}$. Frekvencijsko područje, preslušavanje i pritisak igle (2...6 p) zadovoljavaju kod ovih zvučnica. Bitna slaba strana ovih zvučnica je nedovoljna otpornost prema klimatskim promjenama, i zato nisu pogodne za tropsku izvedbu. Impedancija zvučnice je visoka i uvjetovana je njezinim kapacitetom, koji iznosi 1000...2000 pF.

Keramička zvučnica izrađena je od polikristalnog materijala, sinterovanog barijum-titanata. Da bi taj materijal dobio određena piezoelektrična svojstva, on se mora formirati (polarizirati) visokim istosmernim naponom na određenoj temperaturi. U kućištu se pričvršćuje jednakom kao kristalni pretvarač, preko elastičnog ležaja. Vezni element koji preuzima pomake igle preko nosača igle drugačije je oblikovan nego u kristalnoj zvučnici, jer keramički pretvarač radi na principu savijanja, a ne torzije (sl. 58). Potrebni pritisak je oko 4 p, a izlazni napon između 0,5 i 1 V. Frekvencijska je karakteristika pri višim frekvencijama lošija nego kod kristalne zvučnice. Da bi se smanjilo rezonantno nadvišenje pretvarača, sistem se posebno prigušuje. Iako su elektroakustička svojstva keramičkog pretvarača lošija nego kristalnog, ipak se često primjenjuje zbog otpornosti prema atmosferskim utjecajima. Impedancija zvučnice je visoka i uvjetovana njezinim kapacitetom.

Izlazni napon kristalne i keramičke zvučnice proporcionalan je amplitudi titranja igle.

Elektromagnetska zvučnica izrađuje se bilo kao sistem s pomičnim magnetom bilo kao sistem s promjenljivim magnetskim otporom. U zvučnici s pomičnim magnetom mali (keramički) magnet u obliku štapa čini s nosačem igle jedinicu. Ta je jedinica elastično učvršćena i pomična između polnih nastavaka (u jednokanalnoj izvedbi 2, a u stereo-zvučnici 4) na kojima se nalazi po jedna zavojnica. U ritmu signala pomaci se igle prenose na magnet i time se u zavojnica inducira izmjenični napon.

U magnetskoj zvučnici s promjenljivim magnetskim otporom nalazi se nosač igle na kotvici od feromagnetskog materijala. Na permanentnom magnetu, čiji se tok zatvara kroz kotvu, nalaze se zavojnice. Pomaci igle nastali modulacijom brazde uzrokuju promjene zračnog raspora i time promjenu magnetskog toka. Uslijed toga se u zavojnica inducira napon. Izlazni napon

ovih zvučnica iznosi 10...25 mV pri $v_0 = 14 \text{ cm/s}$ i $f = 1000 \text{ Hz}$. Impedancija ovakvih zvučnica je visoka i kreće se oko $10 \text{ k}\Omega$. Potrebni pritisak igle je od 0,75 do 3 p. Magnetske su zvučnice zasad najkvalitetniji sistemi za reprodukciju zvuka s ploča.

Elektrodinamička zvučnica. U elektromagnetskoj zvučnici bili su pokretni ili permanentni magnet ili kotva, u elektrodinamičkoj zvučnici (sl. 59), pak, pomiče se mala zavojnica (u zvučnicu za stereo-reprodukciiju dvije) u jakom magnetskom polju. Preko jakе veze pomaci igle prenose se putem nosača na zavojnici. Za dobivanje magnetskog polja upotrebljava se dosta težak permanentni magnet koji povećava efektivnu masu zvučnice. Prednost je elektrodinamičke zvučnice što ima veoma malo izobličenje. Izlazni napon iznosi $\sim 7 \text{ mV}$ pri $v_0 = 14 \text{ cm/s}$ i $f = 1000 \text{ Hz}$, ali je frekvencijsko područje ograničeno i ide oprimjene do 10 kHz. Impedancija je te zvučnice mala: iznosi nekoliko desetaka om.

Poluvođička zvučnica izvedena je slično kao piezoelektrična. Umjesto kristalnog ili keramičkog pretvarača sadrži poluvodički materijal kojemu se otpor pri mehaničkim deformacijama jako mijenja. Ove promjene uvjetuju promjenu struje u krugu sa stalnim izvorom. Budući da je masa pomičnog dijela vrlo mala, takvom se zvučnicom mogu postići dobre karakteristike.

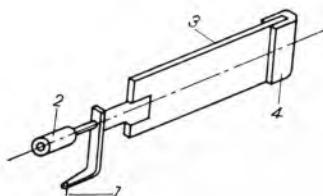
Kapacitivna zvučnica pretvara mehanička titranja igle u oscilacije napona posredstvom promjene kapaciteta. Ona radi slično kao kondenzatorski mikrofon. U *fotoelektričnoj zvučnici* nalaze se na nosaču igle zasloni (blende) s dva otvora kroz koje svjetlo iz tinjalice pada na dvije foto-diode u taktu modulacije na ploči. Kvalitet je reprodukcije i kapacitivnom i fotoelektričnom zvučnicom, zbog njihove male efektivne mase, izvanredan, ali ovi su sistemi veoma skupi.

Šumovi i izobličenja pri reprodukciji ploča. Dinamika je prema malim jakostima zvuka ograničena naponima smetnji: šumom koji nastaje uslijed zrnate strukture ploče i zbog oštećenja igle; potresanjem koje se pojavljuje zbog vibracija motora i mehaničkog sistema; pucketanjem uzrokovanim prašinom, elektrostatičkim izbijanjem, itd. Izobličenja ograničuju dinamiku prema gore. Do linearnih izobličenja, tj. gubitaka na visokim frekvencijama, dolazi ako je brzina urezivanja unutarnjih brazda bila prevelička, tj. iznad granica prikazanih na sl. 54.

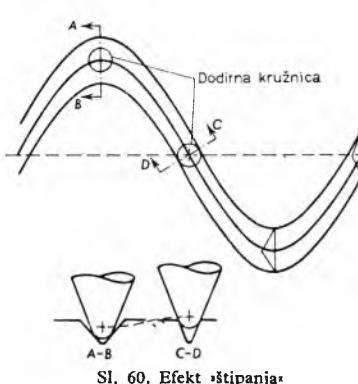
Izbličenje traga nastaje zato što se brazda reže trobridnim nožem, a zvuk reproducira iglom koja ima šiljak kuglasta oblika. Zbog te razlike oblika, srednja točka igle pri reprodukciji ne opisuje istu krivulju kao nož pri snimanju. To uzrokuje pri dubinskom rezu, gdje se dobije povećanje grebena i smanjenje udubine, parne i neparne harmonike, tj. nelinearno izobličenje. Pri bočnom rezu nastaju samo neparni harmonici.

Izbličenje zbog pojave štipanja (engl. pinch effect). Brazda što je urezuje nož pri bočnom zapisu ima konstantnu dubinu, ali se mijenja njena širina zbog oblika i položaja noža,

tako da tragovi stijenki brazde nisu paralelni. Igla kuglasta oblika ne pomiče se stoga samo bočno, već i gore-dolje (jer suženje brazde kao da je štipa i time pritišće prema gore: sl. 60), i to dvostrukom frekvencijom (jer u svakom periodu titranja ima dva proširenja i dva suženja brazde), te tako dolazi do izobličenja sinusoida, pri čemu nastaju neparni harmonici.



Sl. 58. Keramička zvučnica. 1. Igla, 2 prednji gumeni ležaj, 3 kristalni element, 4 stražnji gumeni ležaj

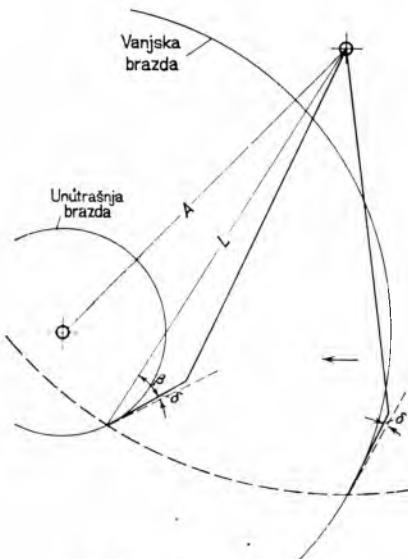


Sl. 60. Efekt štipanja.

Nepravilan položaj zvučnice prema brazdi također je uzrok izobličenjima. Tonska se ručka ne pomiče, kao nož, okomito na brazdu, već se pri reprodukciji ploče kreće po kružnoj putanji od vanjskog ruba prema sredini (sl. 61 a). Pri tome se kut δ što ga simetrala zvučnice zatvara sa simetralom dna brazde stalno mijenja, pa čim on nije jednak nuli, pojavljuje se izobličenje. Pogodnim izborom duljine ručke L i udaljenosti A od sredine ploče do vertikalne osi ručke, kao i prikladnim izborom kuta β za koji je simetrala zvučnice stalno zakrenuta prema simetrali ručke, može se postići da kut δ ne bude velik i da u toku jedne reprodukcije dva puta prođe kroz nulu. To se postiže ako se bira $L > A$ i kutu β dade vrijednost $\sim 25^\circ$.

Zbog nelinearne prijenosne karakteristike zvučnice pojavljuju se uz navedena harmonička izobličenja i neharmonička izobličenja nastala modulacijom (intermodulacijska izobličenja). Izobličenje nastalo efektom štipanja i izobličenje traga smanjuje se upotrebom biradijalne igle, oblikom presjeka sličnije nožu za urezivanje. (Zbog manjeg dodira s brazdom ona traži veći pritisak pa se brže troši i više kvari ploču.) Također primjenom malog pritiska i davanjem predizobličenja prilikom snimanja, izobličenja se smanjuju.

Opisana izvedba ručke dovodi do tzv. skating-sile, koja vuče iglu prema sredini ploče, zbog čega dolazi do jačeg pritiska na unutarnju brazdu. Ova sila raste s većim pritiskom. Stoga se unutarnja brazda više troši, uslijed čega nastaje izobličenje. Kvalitetni gramofoni imaju kompenzaciju te pojave.



Sl. 61. Kretanje igle po ploči

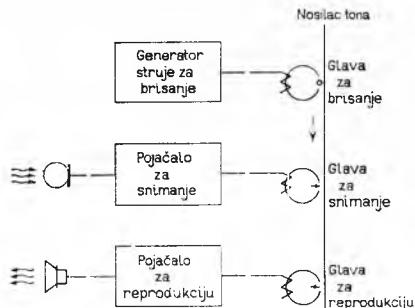
Tolerancije. Dopushteno odstupanje od nominalne brzine vrtnje ploče je 2...3%. Mnogo su kritičnije periodičke promjene brzine vrtnje jer ih uho osjeća kao promjenu visine tona. One ne smiju preći vrijednost od $\pm 3\%$. Da bi se smanjile te promjene, treba da masa tanjura iznosi bar 2 kg, a motor da je amortizacionim gunicama ili oprugama pričvršćen na pogonski mehanizam.

Magnetska reprodukcija zvuka

Pri reprodukciji zvuka koja se osniva na magnetskim pojавama valja razlikovati tri odvojene faze: snimanje, reprodukciju tona i brisanje ranijih zapisa (sl. 62).

Magnetsko snimanje zvuka odvija se načelno tako da se struja niske (tonske) frekvencije koju daje elektroakustički pretvarač zvuka (npr. mikrofon), nakon pogodnog pojačanja, vodi kroz svitak glave za snimanje. Ova ima zračni raspored koji uzrokuje da se magnetski tok što ga stvara struja kroz svitak zatvara kroz nosilac tona. Nosilac tona (vrpcu, žicu) kreće se određenom brzinom pred zračnim rasporom i magnetizira se rasipnim poljem koje se tamo stvara. Ton se pohranjuje u nosiocu s pomoću remanentno magnetiziranih čestica u njemu. *Reprodukcijska tona* provodi se obratno. Silnice pojedinih permanentno magnetiziranih čestica nosioca koje se nalaze ispred raspora glave za reprodukciju zatvaraju se kroz njezinu feromagnetsku jezgru izazivajući promjen-

ljivu magnetsku indukciju zbog koje se u svitku glave induciraju naponi koji i po frekvenciji i po amplitudi odgovaraju snimljenom zvuku.



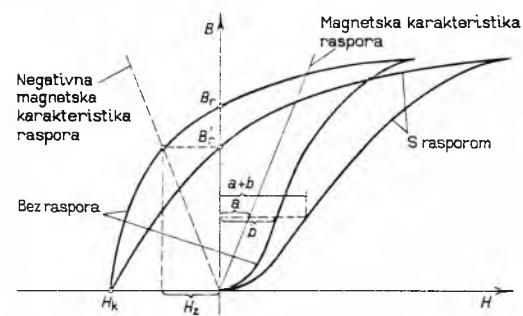
Sl. 62. Shematski prikaz postupka brisanja, snimanja i reprodukcije zvuka magnetskim putem

Prije nego se na već upotrijebljeni nosilac snimi novi zvuk, valja stari »magnetski zapis« s njega izbrisati. To se radi *glavom za brisanje*, i to ili istosmernom ili visokofrekventnom izmjeničnom strujom.

Magnetski krug. Pri magnetskoj je reprodukciji zvuka veliki dio problema vezan za pojave u tzv. magnetskom krugu. Pod tim se pojmom razumijeva staza u kojoj postoji magnetski tok, ako tu stazu sačinjavaju dijelovi ili jezgre od feromagnetskog materijala. Magnetski tok, koji nigdje ne može biti prekinut, postoji na samoj u sebe zatvorenoj feromagnetskoj jezgri. Magnetski krug može na jednom ili više mesta biti i prekinut; mesta prekida zovu se (zračni) *raspori*. Pri magnetskoj reprodukciji zvuka magnetske krugove čine željezne ili feritne jezgre pojedinih glava zajedno s feromagnetskim slojem nosioca tona. Ovi magnetski krugovi imaju jedan ili dva raspore. Magnetski se krug može pobuditi vanjskim poljem ili elektromagnetom. Radi toga nalazi se obično na jezgri svitak sa N zavoja kojima protjeće struja I . Produkt $N I$ zove se protjecanje (magnetski napon) Θ i ono izaziva stvaranje i održavanje magnetskog toka Φ u krugu. Veličina tog toka ovisi o permeabilnosti (magnetskoj propustljivosti) μ , srednjoj duljini l magnetskog kruga i njegovog presjeka S , odnosno, ako krug nije homogen, od sume tih veličina u pojedinim dijelovima, što prikazuje izraz:

$$NI = \Theta = \Phi = \sum \frac{l_v}{\mu_v S_v}.$$

Usporedi li se taj izraz s Ohmovim zakonom: $E = I \cdot R = I \cdot e l/S$, uočava se izvjesna sličnost oblika. Stoga se ponekad protjecanje $\Theta = NI$ zove i magnetomotorna sila (kao analogija elektromotornoj sili E), a izraz $\sum \frac{l_v}{\mu_v S_v}$ magnetski otpor (kao analogija omskom otporu R). Podijeli li se magnetski tok magnetskog kruga na promatranoj mjestu presjekom tog kruga (jezgre), dobiva se gustoća magnetskog toka, tzv. *indukcija* $B = \Phi/S$, a podijeli li se protjecanje (magnetomotorna sila) srednjom duljinom magnetskog kruga, dobiva se tzv. *jakost polja* $H = NI/l$.



Sl. 63. Krivulje magnetiziranja za magnetski krug bez raspora i s rasporedom

Na sl. 63 prikazana je *krivulja magnetiziranja* koja pokazuje ovisnost indukcije B o jakosti magnetskog polja H . Oblik krivulje

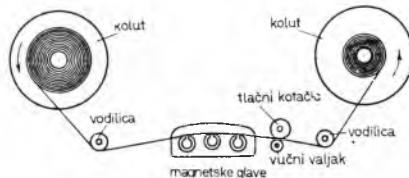
BH ne ovisi o dimenzijama ispitivanog prstena već samo o materijalu od kojeg je napravljen. Indukcija koja preostaje nakon magnetiziranja materijala da zasićenja i nestanka pobudne struje ($H = 0$) zove se *remanencija* B_r , a jakost magnetskog protupolja (polja suprotna smisla) koje je potrebno uspostaviti da bi se remanencija poništila (da bi postalo $B_r = 0$) zove se *koercitivna sila* H_k . Za magnetsko snimanje i reprodukciju zvuka iskoristiava se samo magnetsko polje u zračnom rasporu i oko njega. Da bi se u magnetskom krugu s rasporom postiglo zasićenje, potrebna je veća jakost polja H , tj. više amper-zavoja po metru nego u krugu bez raspora, a remanencija B_r je manja. Na sl. 63 vidi se kako se zbog zračnog raspora smanjuje remanencija sa B_r na $B_{r'}$.

Za određivanje magnetskog stanja permanentnog magneta s bilo kakvim rasprom potrebno je imati samo onaj dio karakteristike BH po kojoj se zatvoreni magnetski prsten demagnetizira. Okrene li se nakon prvog magnetiziranja smjer pobude (jakosti polja H), dobit će se na donjoj polovini dijagrama identična centralno-simetrična krivulja. Podvrgne li se neki feromagnetski materijal stalno takvom cikličkom premagnetiziranju, indukcija B opisivat će krivulju nazvanu *petlja histereze*. Usku petlju histereze imaju »meki« magnetski materijali (s malom koercitivnom silom H_k), a »tvrdi« magnetski materijali imaju široku petlju histereze (sl. 64). Samo se »meki« magnetski materijali podvrgavaju cikličkom premagnetiziranju, jer energija koja se troši na premagnetiziranju i pretvara u toplinu za njih nije znatna. Povišenjem frekvencije struje magnetiziranja povećavaju se i gubici zbog vrtložnih struja i histerezni gubici.

Za prikazivanje magnetskih procesa često je prikladnije umjesto statičke krivulje magnetiziranja upotrijebiti *dinamiku magnetskog karakteristika*, koja prikazuje ovisnost remanencije B_r o jakosti polja (v. sl. 72).

Magnetofon je uređaj za magnetsko snimanje i reproduciranje zvuka, a sastoje se od mehaničkog i elektroničkog dijela.

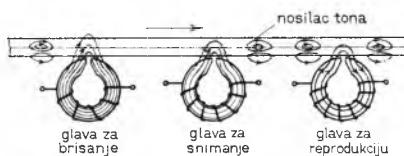
Elektro-mehanički pogonski dio magnetofona povlači nosiča tona, najčešće vrpcu, ispred glave za brisanje, snimanje i reprodukciju (sl. 65). Za povlačenje vrpce služi vučni valjak tjeran obično sinhronim motorom. Da bi se spriječilo klizanje vrpce po valjku,



Sl. 65. Schematski prikaz mehaničkih dijelova magnetofona s vrpcom

ona je gumenim tlačnim kotačem pritisнутa na vučni valjak. Snimljeni dio vrpce namata se na kolut za namatanje koji je pogonjen preko odgovarajućeg prijenosa elektromotorom. Brzina kojom klizi nosič tonu po prednjim plohamagnetski glava mora biti pri snimanju i pri reprodukciji sasvim ista.

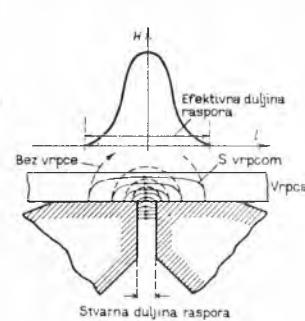
Magnetofonske glave. Magnetofon ima tri glave koje su načelo slične utoliko što se sve sastoje od zavojnice smještene na



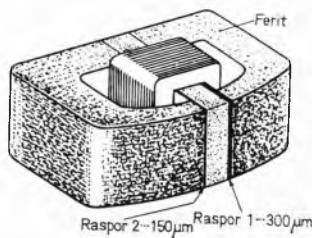
Sl. 66. Izgled magnetskog polja pred rasporedom glava za brisanje, snimanje i reprodukciju

feromagnetskoj jezgri s jednim ili dva raspora ispunjena nekim paramagnetskim materijalom. Raspori imaju zadatku da povećaju

otpor magnetskom krugu i time pomažu da se formira ispred raspora polje pogodnog oblika, koje se zatvara kroz feromagnetski sloj vrpce. Prva glava služi za brisanje, druga za snimanje, a treća za reprodukciju. Na sl. 66 vidi se oblik polja pojedine glave. Prednost je magnetofona s trima glavama što se njime istovremeno mogu vršiti sva tri procesa. U jednostavnijim se uređajima upotrebljava ista glava za snimanje i reprodukciju, ali se u tom slučaju snimanje ne može neposredno pratiti slušanjem snimke. Sve glave moraju biti otporne prema habanju do kojeg dolazi uslijed dodira s vrpcom koja po njima kliže.



Sl. 67. Stvarni i efektivni raspori glave



Sl. 68. Glava za brisanje s feritnom jezgrom i dva raspora

što manja izobličenja i da je što manje osjetljiva prema vanjskim poljima. Glava za snimanje mora udovoljiti još i ovim zahtjevima: polje ispred raspora treba da ima strmi bočni pad; jakost polja ispred raspora mora biti proporcionalna pobudnoj struci; vlastita rezonancija električnog sistema glave treba da je iznad frekvencije predmagnetiziranja.

Glava je izrađena od tankih limova Permalloya. Optimalna je širina raspora $10\text{--}30 \mu\text{m}$, ovisno o brzini vrpce. Glava za snimanje ima obično još i stražnji raspor radi sprečavanja štetnih utjecaja stranih vanjskih polja i pojave koje izaziva nejednoliko prianjanje vrpce.

Glava za reprodukciju mora udovoljiti mnogo strožim zahtjevima: raspor glave mora biti što uži da ne bi došlo do slabljenja za višim frekvencijama; gubici od histereze i vrtložnih struja moraju biti mali; remanencija materijala treba da bude što manja, kako bi nakon slučajnog magnetiziranja jezgre magnetska indukcija imala što manju vrijednost (prikladan materijal je Permalloy s dodatkom molibdena); mora biti dobro zaštićena od električnih i magnetskih polja. Duljina raspora kreće se od 5 do $20 \mu\text{m}$.

Kombinirane glave. Umjesto da se za svaki proces upotrijebi posebna glava, može se i jedna kombinirana glava primijeniti za dva procesa, npr. za snimanje i reprodukciju. Takve glave imaju zajedničku željeznu jezgru, npr. oblike slova E, sa dva raspora i dva svitka, za svaku funkciju po jedan. Zbog toga što takve glave nemaju stražnjeg raspora, dolaze prilikom snimanja više do izražaja smetnje uslijed hrapave i valovite površine vrpce, što daje hrapav ton.

Glava za stereofonsko snimanje kombinacija je dviju glava koje su postavljene jedna iznad druge na razmaku od $0,5\text{--}1 \text{ mm}$ radi sprečavanja utjecaja snimke jednog kanala na snimku drugog kanala.

Osim navedenih glava za reprodukciju postoje i glave koje rade s pomoću elektronskog mlaza ili na principu Hallova efekta. One se, međutim, rijedko upotrebljavaju.

Za snimanje na više pruga smještaj početka i kraja pojedine pruge propisan je standardima. Na sl. 69 shematski su prikazani raspori i njihov položaj na glavama za snimanje na jednoj, dvije ili četiri pruge.

Nosioci tona koji su danas u upotrebi imaju oblik žice, vrpce, ploče ili valjka. Vraca omogućuje najviši kvalitet snimaka, a osim toga može se rezati i lijepiti. Vraca mora imati dobra mehanička i električna svojstva. Koercitivna sila treba da bude između 16 i 40 kA/m (200 i 500 ersteda), remanencija što viša, a sva magnetska i mehanička svojstva moraju duž cijele duljine vrpcu biti jednakih.

Vraca se izrađuje u dvije izvedbe. Pri proizvodnji slojnih vrpca magnetski se materijal (željezni oksid Fe_2O_3) nanosi kao posebni sloj na foliju od poliviniklorida ili poliestera, a kod druge izvedbe vrpcu se impregnira feromagnetskim materijalom. Širina vrpcu iznosi prema međunarodnim preporukama $6,25 \pm 0,05$ mm ($\frac{1}{4}$ "), a njezina debljina ne smije biti veća od 0,6 mm. Uobičajene debljine vrpcu jesu 18 µm, 24 µm i 34 µm, a debljine sloja 4 do 13 µm. Za visokokvalitetne stereo-magnetofone, videofone i višekanalne specijalne uređaje izrađuju se vrpe širine, npr. $\frac{1}{2}$ ", 1" i 2". Uske vrpe širine 3,81 mm izrađuju se isključivo za kasete.

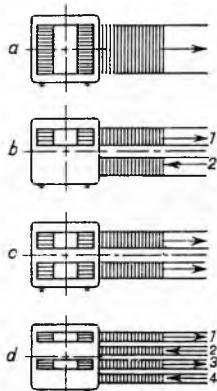
U novije vrijeme upotrebljava se kao magnetski materijal za nosioce tona krom-dioksid (CrO_3). On ima mnogo finiju strukturu nego Fe_2O_3 , pa se nije i pri manjim brzinama postiže znatno viša gornja granica frekvencija.

Prema međunarodnim preporukama magnetsko se snimanje izvodi pri ovim brzinama: 76, 38, 19, 9,5, 4,75 i 2,4 cm/s. Što je brzina kretanja nosioca veća to je reprodukcija bolja.

Kasete. Konstrukcija modernog magnetofona ne zadovoljava potpuno u pogledu lakoće rukovanja vrpcom. Kao nedostaci se osjećaju, npr., veliki kolutovi, umetanje vrpcu, potreba premotavanja pri skidanju vrpcu, mogućnost oštećenja i onečišćenja vrpcu. Ti su nedostaci uklonjeni upotrebom kaseteta od plastične mase, u kojima se vrpcu nalazi zaštićena za cijelo vrijeme sviranja i koje se veoma jednostavno umjeću u magnetofon i vade iz njega. Razvojem novih materijala za nosioce tona postignut je veoma dobar kvalitet reprodukcije i pri malim brzinama vrpcu (4,75 cm/s) koji se upotrebljavaju s kasetama da bi se produljilo vrijeme sviranja.

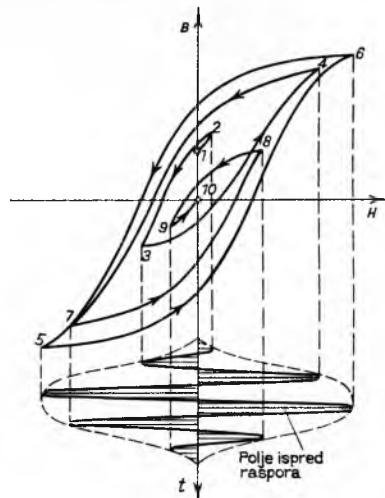
U Evropi se najviše upotrebljava kaseteta koja ima dva koluta, kao normalni magnetofon, i vrpu širine 3,81 mm, za mono- i stereo-snimanje i -reprodukciiju. Kasetete dolaze na tržištu bilo sa snimljenom vrpcom (kao ploče) bilo prazne. Vrijeme sviranja kasetete kreće se od 2×8 minuta do 2×60 minuta. U Americi se osim takvih kaseteta upotrebljavaju i kasete s jednim kolutom i otvorom, i kasete s beskonačnom vrpcom na kojoj je snimljen program. Kasete se izvode i kao osmerokanalne.

Rad magnetofona. Brisanje stare snimke može se izvesti istosmjernim ili izmjeničnim poljem. Brisanje istosmjernim poljem,



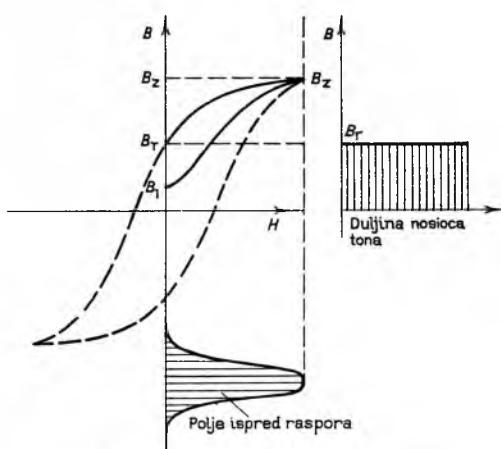
Sl. 69. Raspored glava i snimaka na traci za jedno-, dvo- i četvoroprugu snimku

jednoliko magnetiziran. Brisanje izmjeničnim poljem provodi se tako da se tonski nosilac pri prolazu kroz izmjenično polje postupno magnetizira do zasićenja (sl. 71, točke 1...6), tj. do granične petlje histereze: Izlazeći iz polja materijal se nosioca razmagnetizira po sve manjim petljama histereze (točke 7...9) sve dok magnetska indukcija ne postigne vrijednost nula (točka 10). Da bi došlo do brisanja, mora postojati određeni odnos između efektivne duljine raspora i broja perioda razmagnetizirajućeg polja, tj. duljine »magnetskog vala«, koji pri određenoj brzini vrpe ovisi o frekvenciji struje brisanja. Svaki element tonskog nosača mora, naime, proći u izlaznom dijelu polja bar kroz dvadesetak ciklusa razmagnetiziranja da bi se postigla indukcija jednaka nuli. Za brisanje upotrebljavaju se u praksi struje frekvencije 30...100 kHz uz geometrijsku duljinu raspora glave za brisanje 200...500 µm.



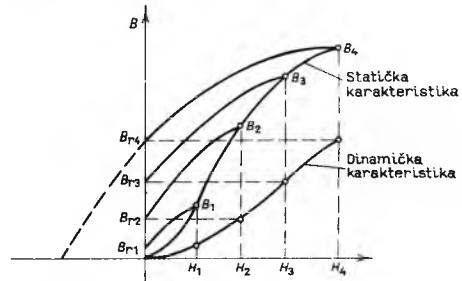
Sl. 71. Brisanje snimke izmjeničnim poljem

Snimanje zvuka. Fizikalni proces snimanja može se pratiti s pomoću *dinamičke karakteristike* koja prikazuje vrijednost remanencije B_r preostale nakon uklanjanja polja. Dinamička karakteristika $B_r = f(H)$ može se dobiti iz statičke karakteristike (sl. 72) ako se u koordinatnom sistemu nad pojedine jakosti polja $H_1 \dots H_4$ nanesu pripadne remanencije $B_{r1} \dots B_{r4}$. Kao što se vidi



Sl. 70. Brisanje snimke istosmjernim poljem

koje se danas rijedno upotrebljava, vrši se tako da se kroz svitak glave za brisanje pušta istosmjerna struja takve jakosti da se magnetska indukcija u nosiocu tona (sl. 70) s neke vrijednosti B_z povećava do zasićenja B_1 . Nakon izlaska nosioca tona iz polja demagnetizirajuća indukcija spadne na remanenciju B_r , tako da je cijeli nosilac



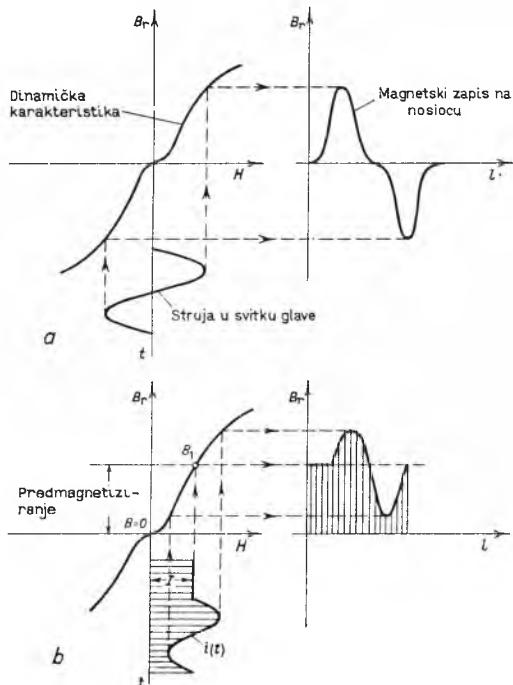
Sl. 72. Statička i dinamička magnetska karakteristika

na sl. 73 a, zbog zakrivljenosti dinamičke karakteristike u njezinu početnom dijelu, na neutralnom (nemagnetiziranom) nosiocu tona dolazi do velikog harmoničkog izobličenja, koje uzrokuje pojavu trećeg harmonika i onemogućuje primjenu takvog snimanja u tehničkoj praksi. Stoga se primjenjuje predmagnetiziranje.

Istosmjernim predmagnetiziranjem (sl. 73 b) pomici se radna točka iz položaja $B = 0$ u sredinu ravног dijela karakteristike, tj. u točku B_1 . To se postiže time što se istosmjernoj struci koja služi za predmagnetiziranje I u namotu glave superponira izmjenična tonska komponenta $i(t)$.

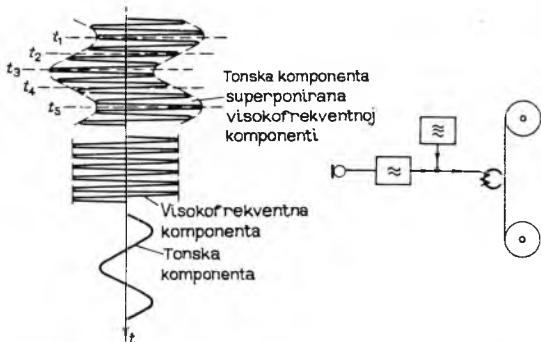
Istosmjerno predmagnetiziranje, koje se još i danas često primjenjuje u jeftinijim magnetofonima s kasetama, ne upotrebljava se više u modernim kvalitetnim magnetofonima, prevenstveno zbog toga što se njime nedovoljno smanjuje harmoničko izobličenje, a zatim i zbog snižene dinamike. Harmonička izobličenja

su osim zakrivljenošću dinamičke karakteristike uzrokovana i pojavom samodemagnetiziranja i efektom raspora koji se pojavljuje na višim frekvencijama (v. dalje), a ionako suženu dinamiku dalje smanjuje šum koji nastaje zbog magnetske nehomogenosti nosioca tona, tako da pri snimanju s istosmjernim predmagnetiziranjem dinamika nije veća od 38 dB. Da bi se postigla linearnost dinamičke karakteristike, vrši se visokofrekventno predmagnetiziranje, kojim je magnetsko snimanje postalo najsavršeniji način snimanja zvuka.



Sl. 73. Direktno snimanje na magnetski neutralnom nosiocu tona (a) i pri istosmjernom predmagnetiziranju (b)

Snimanje s visokofrekventnim predmagnetiziranjem. Tonfrekventna i visokofrekventna struja privode se istovremeno glavi za snimanje, tako da se obje struje superponiraju. Rezultat superpozicije vidi se na sl. 74. Proces magnetiziranja nosioca tona može se shvatiti kao da u pojedinom momentu — označenom na slici slovima t_1 do t_5 — kratko vrijeme djeluje istosmjerna komponenta, određena trenutnom vrijednošću tonske struje u tim momentima. Svakom tom momentu odgovara polje kojim je određena vrijednost indukcije u nosiocu tona. Nositac tona izaći će iz polja magnetiziran samo tonskom komponentom, a visokofrekventna komponenta ima samo pomoćnu ulogu.



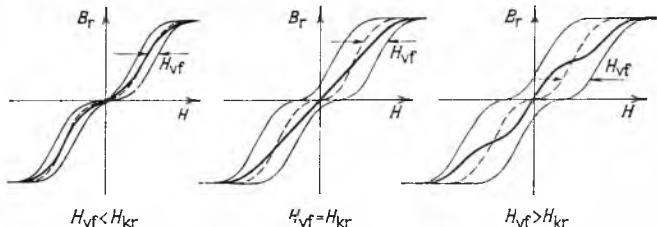
Sl. 74. Visokofrekventno predmagnetiziranje. Svitak se napaja visokofrekventnom strujom (~) kojoj je superponirana tonska komponenta (označena trima valovima)

Kad nema signala, na nosilac tona djeluje samo visokofrekventno polje i u tom slučaju on se ne magnetizira. Dakle, drukčije nego pri snimanju s istosmjernim predmagnetiziranjem,

na mjestima gdje nema signala (stanke u govoru i glazbi) nosilac tona je magnetski neutralan, pa nema ni šuma.

Iz dosadašnjeg izlaganja moglo se uočiti da je svrha visokofrekventnog predmagnetiziranja da se tonfrekventna komponenta prenese u linearno područje dinamičke karakteristike, kako bi se dobilo što manje izobličenje. To se najbolje vidi iz dinamičke karakteristike drugog reda, koja se dobiva kako pokazuje sl. 75: dinamička se krivulja remanencije pomakne za vrijednost H_{vf} jedanput ulijevo, $B_{vf}(H) = B_r(H - H_{vf})$, a drugi put udesno, $B_{vf}(H) = B_r(H + H_{vf})$, vertikalne se udaljenosti između novih krivulja raspolove u kroz tako dobivene točke povuče krivulja. (H_{vf} je visokofrekventna komponenta polja.) Na sl. 75 može se vidjeti da nakon nestanka polja, tj. nakon vraćanja jakosti magnetskog polja na vrijednost nula, materijal ostaje nemagnetiziran, tj. proces je reverzibilan, ako je promjena jakosti magnetskog polja H_{vf} manja od određene kritične vrijednosti H_{kr} ; ako se jakost polja poveća iznad vrijednosti H_{kr} , nakon vraćanja magnetskog polja na nulu materijal ostaje magnetiziran na odredenu vrijednost magnetske gustoće, proces je ireverzibilan.

Na krivuljama sl. 75, gdje je uzeta u obzir visokofrekventna struja predmagnetiziranja, uočava se i utjecaj te struje na linearnost. Oblik i nagib dinamičke karakteristike drugog reda ne ovise samo o visokofrekventnoj komponenti polja, nego i o nagibu dinamičke karakteristike prvog reda, dakle o materijalu. O obliku dinamičke karakteristike drugog reda, pak, ovisi harmoničko izobličenje i izlazni napon. Ako je struja predmagnetiziranja mala, izobličenje će biti veliko zbog koljena dinamičke karakteristike prvog reda. Povećanjem struje predmagnetiziranja krivulja se ispravlja i postaje strmija, što znači da se harmoničko izobličenje smanjuje, a izlazni napon povećava. Kad struja predmagnetiziranja ima određenu vrijednost, krivulja degenerira u pravac, pa će i izobličenje biti najmanje. Uz visokofrekventno predmagnetiziranje linearni dio dinamičke karakteristike mnogo je veći (oko dva puta), a razina šuma je niža, što omogućuje dinamiku do 60 dB.



Sl. 75. Ovisnost oblika dinamičke karakteristike drugog reda o amplitudi struje predmagnetiziranja

Izobličenja pri magnetofonskoj reprodukciji zvuka. Ni visokofrekventnim predmagnetiziranjem ne mogu se sasvim spriječiti harmonička izobličenja. Ona su ovisna o struci predmagnetiziranja i najmanja su za određenu vrijednost te struje, kako je naprijed rečeno.

Prilikom snimanja smanjuju se amplitude titraja visokih tonskih frekvencija zbog efekta raspora, efekta samodemagnetiziranja, efekta prodiranja, površinskog efekta i nehomogenosti magnetskog materijala.

Efekt raspora pri snimanju. Ako se signal promijeni za vrijeme dok dio nosioca tona prolazi kroz silazni dio polja, snimi se manja amplituda pa su i remanencije B_r manje nego ispred raspora. Rezultat je isti kao da se povećala duljina mehaničkog raspora ili smanjila strmina silaznog dijela polja.

Efekt samodemagnetiziranja. Na višim frekvencijama, kracim magnetskim valnim duljinama, polarizacija elementarnih magneta je manja, pa lakše dolazi do razmagnetiziranja. Taj efekt znatno ovisi o vrsti magnetskog materijala i o brzini tonskog nosioca.

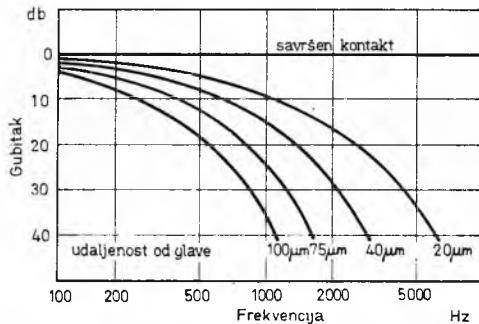
Efekt prodiranja. Dubina magnetiziranja sloja magnetskog materijala ovisi o magnetskoj valnoj duljini. Kad je valna duljina veća, magnetiziranje prodire dublje. Kako kod malih valnih duljina (visokih frekvencija) nema one proporcionalnosti između izlaznog napona na glavi za reprodukciju i prodiranja polja u nosilac tona koja postoji na niskim frekvencijama, na visokim frekvencijama opada napon jer je zbog manje remanentne magnetske gustoće u glavi i inducirani napon manji.

Površinski efekt. Kad je nosilac tona vrpca, površinski efekt ne predstavlja veći problem, ali kod žice se torzionalno savijanje očituje kao neritmičko kolebanje amplituda visokih tonova.

Nehomogenosti magnetskog materijala. Zbog nehomogenosti magnetskog materijala sve čestice na vrpcu nemaju ista magnetska svojstva, tj. one ne postižu magnetsko zasićenje pri istoj jakosti polja, a i koercitivna sila im je različita. Dvije čestice koje se nalaze na istom mjestu vrpcu ali imaju različita magnetska svojstva dat će isti signal na različitim udaljenostima od raspore, pa će doći do fazne razlike, što kod reprodukcije dovodi do smanjenja napona.

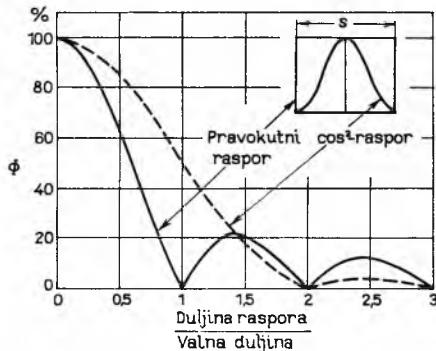
Slabljene amplituda nastupa na visokim frekvencijama prilikom reprodukcije zbog nejednolike raspodjele polja, zbog efekta raspore, zbog nagiba glave i zbog gubitka snage.

Raspodjela polja oko nosioca tona nije jednaka za sve frekvencije. Što je magnetska valna duljina veća, to će magnetsko polje uz iste amplitude indukcije dalje prodrijeti u okolini prostora. U nekoj određenoj udaljenosti od nosioca tona polje je to slabije što je frekvencija viša. Umetnu li se između trake i glave listići debljine samo nekoliko mikrometara, oslabljuju se time najviše tonske frekvencije za desetak decibela (sl. 76). U praksi do udaljavanja trake može doći zbog nečistoće aktivne površine vrpcu ili glave. Prigušenje magnetskog toka u jezgri glave za reprodukciju uslijed efekta udaljavanja, ovisno o udaljenosti, može se izraziti formulom $A = e^{2\pi d/\lambda}$, gdje je d udaljenost vrpcu od glave, a λ valna duljina.



Sl. 76. Gubitak na izlaznom naponu u ovisnosti o razmaku između vrpcu i glave za reprodukciju pri brzini vrpcu 19 cm/s

Efekt raspore pri reprodukciji. Zbog svoje velike permeabilnosti, glava za reprodukciju gotovo potpuno magnetski šantira dio nosioca tona koji se nalazi točno ispred raspore. U slučaju savršenog šantiranja imao bi tok magnetskih silnica kroz nosilac tona pravokutan oblik. U praksi takvo savršeno šantiranje ne postoji jer se tok proširi i dalje od rubova raspore u obliku zvona (sl. 77).



Sl. 77. Dijagram funkcije raspore za pravokutni i \cos^2 -ni oblik raspore

Taj oblik približno odgovara funkciji $\cos^2 a$. Funkcija pravokutnog raspore glasi: $\Phi = \sin \pi s/\lambda$, gdje je s širina raspore. Dijagram na sl. 77 pokazuje na koji se način, u ovisnosti o smjeru između duljine pravokutnog raspore i valne duljine, mijenja amplituda magnetskog toka. Mjerena pokazuju da se s dovoljnom točnošću umjesto efektivnog oblika raspore ($\cos^2 a$), koji je veći od stvarnog

raspora, može računati s pravokutnim rasporedom dvostrukog duljine stvarnoga.

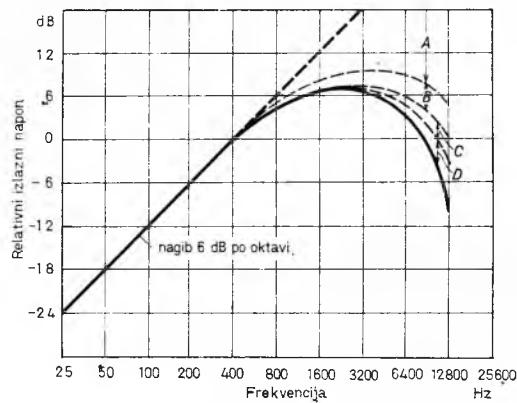
Nagib raspore glave za reprodukciju pojavljuje se kad raspore nije točno paralelan s rasporedom na glavi za snimanje ili ako je vrpcu nagnuta prema glavi, npr. zbog istrošenosti vodilice ili glave.

Ova pojava djeluje kao povećanje efektivne duljine raspore sa S_1 na S_2 (sl. 78). Budući da sada djelovanje zapisa uz gornji rub traga nije u skladu s djelovanjem zapisa uz donji rub, to dolazi do međusobnog poništavanja magnetskog toka i do gubitaka amplituda na višim frekvencijama. Prigušenje A uslijed nagiba raspore glave za reprodukciju može se izračunati po formuli za funkciju raspore, ako se umjesto širine raspore S_1 uvrsti vrijednost $S_2 = b \tan \alpha$, gdje je b širina magnetske pruge, a α kut nagiba raspore. Dobiva se ovaj izraz:

$$A = 20 \lg \frac{\sin \frac{b}{\lambda} \pi \tan \alpha}{\frac{b}{\lambda} \pi \tan \alpha} \text{ dB.}$$

Gubitak snage pojavljuje se jer se pri najvišim tonskim frekvencijama u glavi povećavaju gubici zbog histereze i nastaju vrtložne struje koje rastu s frekvencijom.

Do opadanja napona u području niskih frekvencija dolazi u glavi za reprodukciju (sl. 79). Uzrok toj pojavi treba tražiti u zakonu indukcije. Ako je frekvencija za polovicu niža, i napon će biti za polovicu niži: nagib je frekvencijske karakteristike 6 dB (20 lg 2 dB) po oktavi. U sl. 79 dan je i udio pojedinih opisanih vrsti gubitaka na području visokih frekvencija. Da ne bi došlo do zapostavljanja niskih i visokih frekvencija, potrebno je izvršiti odgovarajuću korekciju u pojačalu magnetofona.

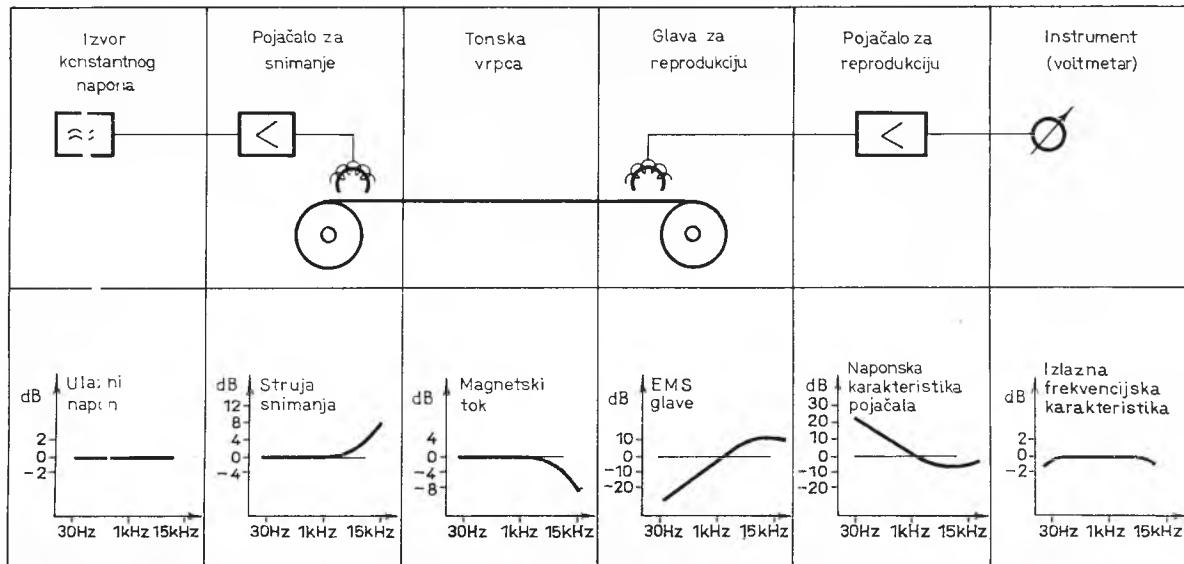


Sl. 79. Krivulja relativnog izlaznog napona (glave za reprodukciju) u ovisnosti o frekvenciji snimljena tako da se glavi za snimanje dovodi uz visokofrekventno predmagnetiziranje tonska struja iste jakosti uz postepeno povišenje frekvencije. Na smanjenje relativnog izlaznog napona pri visim frekvencijama djeluju (u prikazanoj veličini): A samodemagnetiziranje, B efekt prodiranja, C efekt raspore, D gubici u glavi

Šumovi i smetnje pri magnetofonskoj reprodukciji zvuka. Dinamika je i pri magnetskom snimanju ograničena prema dolje naponima s metnji.

Do šumova dolazi zbog nehomogenosti materijala nosioca tona, tj. zbog statističkog kolebanja magnetske gustoće, neželjenog slučajnog istosmjernog magnetiziranja uzrokovanih vanjskim poljima, modulacijskog šuma, izobličene visokofrekventne struje brisanja i snimanja (istosmjerno predmagnetiziranje), neravnosti nosioca tona i glave.

Modulacijski šum zapravo je jedini veći nedostatak snimanja s visokofrekventnim predmagnetiziranjem. Kada je nosilac tona moduliran, signalu se superponira komponenta šuma, koja je jača što je veća trenutna vrijed-



Sl. 80. Prigušne karakteristike pojedinih elemenata u lancu za visokofrekventno magnetsko snimanje zvuka

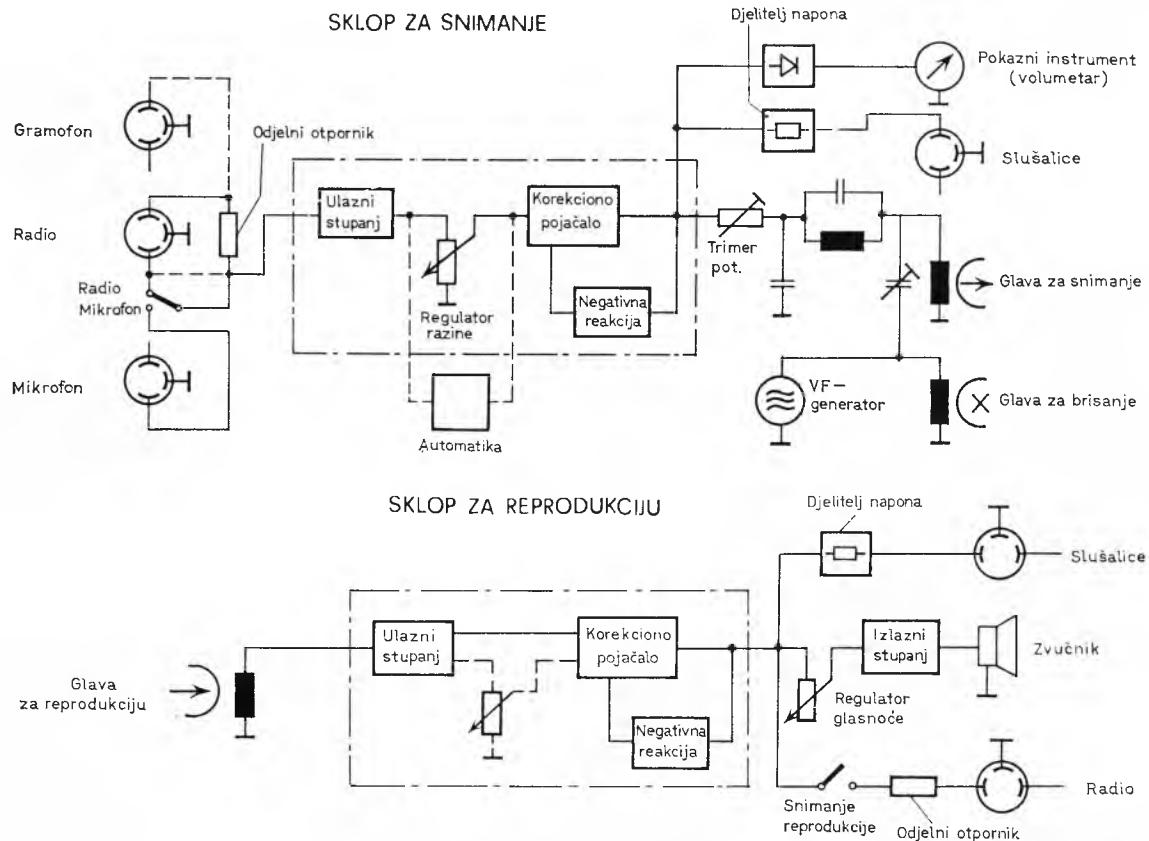
nost magnetske gustoće. Budući da se modulacijski šum pojavljuje samo za vrijeme signala, a ne u stankama, a uz to je proporcionalan amplitudu signala, uho ga mnogo teže zamjećuje nego šum od istosmjernog magnetiziranja. Kod dobrih vrpcu omjer signala prema modulacijskom šumu iznosi ~ 50 dB.

Do frekvenčkih smetnji dolazi uslijed moduliranja bruhanjem, efekta kopiranja (magnetiziranja susjednih zavoja u kolatu), elektrostatičkog izbjivanja, nesavršenog brisanja, interferencije tonskih frekvencija s frekvencijom predmagnetiziranja, a kod višepruznog snimanja i zbog preslušavanja.

Do *kolebanja amplitude* dolazi zbog promjenljivog kontakta i promjene presjeka nosioca tona. Kolebanje brzine vrpcu pri snimanju ili reprodukciji uzrokuje kolebanje visine tona. To kolebanje je uzrokovanu nejednolikom silom motora i nepreciznom mehanikom. Uho zamjećuje kolebanje visine tona veće od 0,03%

pri frekvenciji 7000 Hz, ali prema nižim frekvencijama kolebanje smije biti znatno veće, pa i do 0,5%.

Kriterij za određivanje prigušne karakteristike pojakačala. Dovodi li se glavi za snimanje struja stalne jakosti kojoj se postepeno povisuje frekvencija, dobije se na izlazu iz glave za reprodukciju napon koji se u velikoj mjeri mijenja ovisno o frekvenciji (v. sl. 79, debela krivulja). To vrijedi, naravno, pod pretpostavkom da nije izvršena korekcija radi lineariziranja, koja se mora izvršiti da bi se dobila vjerna reprodukcija. U načelu je svejedno gdje će se izvršiti korekcije prigušne karakteristike, da li u pojakačalu za reprodukciju ili u pojakačalu za snimanje. Ali da bi se vrpcu snimljena na jednom uređaju mogla kvalitetno reproducirati na nekom drugom uređaju, valjalo je ove korekcije standardi-



Sl. 81. Električni spoj magnetofona

zirati i odrediti koje će se korekcije provesti pri snimanju a koje pri reprodukciji. Problem korekcije postaje složeniji ako se povede računa o dinamici i izobličenju, te o tome kako su raspodijeljene vršne vrijednosti pri govoru i glazbi.

Prema preporukama međunarodne organizacije CCIR i IEC magnetski tok vrpce treba da ima (za različite brzine vrpce) određenu karakteristiku. Time je određeno da se dio korekcije izobličenja (tj. izravnjanje zakrivljenog dijela krivulje pri višim frekvencijama, sl. 79) izvrši u pojačalu za snimanje, a drugi dio u pojačalu za reprodukciju (sl. 80). Međunarodno utvrđeni tok prigušne karakteristike vrpce definiran je vremenskim konstantama i graničnim frekvencijama kojima je utvrđen nagib i točka prelaza na drugi nagib. Za brzine vrpce 76 i 38 cm/min vremenska konstanta (v. str. 308) iznosi $35 \mu\text{s}$ (granična frekvencija je 4548 Hz), za brzinu 19 cm/sek vremenska konstanta je $100 \mu\text{s}$ (granična frekvencija 15 492 Hz), za brzinu 9,5 cm/s vremenska konstanta je $200 \mu\text{s}$ (granična frekvencija 796 Hz) a za 4,75 cm/s vremenska konstanta je $400 \mu\text{s}$ (granična frekvencija ~ 400 Hz). Shematski prikaz prigušnih karakteristika pojedinih elemenata u lancu za magnetsko snimanje dan je na sl. 80.

Električni spoj magnetofona. Na sl. 81 gore prikazan je sklop za snimanje. Uzlazni signal, dobiven iz gramofona, radija ili mikrofona, preko ulaznih priključnica dovodi se na ulaz pojačala za snimanje. Potrebna razina pobudnog signala ugada se potenciometrom ili automatski uredajem za regulaciju pobude.

Korektorskim elementima u pojačalu dobiva se potrebna frekvencijska karakteristika snimanja.

Preko promjenljivog potenciometra (trimera potenciometra), koji je visokoomski u odnosu na impedanciju glave za snimanje i visokofrekventnog paralelnog titravnog kruga, spojena je glava za snimanje na izlaz pojačala za snimanje.

Visokofrekventni generator napaja s jedne strane glavu za brisanje visokofrekventnom strujom potrebnom za brisanje vrpce, a istovremeno preko promjenljivog kapaciteta daje potrebnu visokofrekventnu struju za izmjenično predmagnetiziranje, kojoj se superponira niskofrekventna komponenta struje za snimanje. Izlazno pojačalo preko odgovarajućeg spoja za ispravljanje napaja instrument koji služi kao kontrola snimanja. Predслушаće, tj. slušna kontrola snimke, moguće je s pomoću slušalica koje se priključuju na priključnicu za slušalice.

Sl. 81 dolje pokazuje spoj magnetofona pri reprodukciji. Indučirani napon koji se stvara pri prolazu snimljene vrpce u glavi za reprodukciju dovodi se na ulaz pojačala za reprodukciju. Glasnoća u pojačalu za reprodukciju koja ima vlastiti izlazni stupanj rijetko se regulira u stepenu za pojačanje, nego se regulacija glasnoće općenito vrši ispred izlaznog pojačala. I ovdje se korektorskim elementima dobiva potrebna frekvencijska karakteristika pojačala. Izlazni napon dovodi se na radio-priključak preko prilagodnog otpornika i prekidača. Priključnica za slušalice je preko sklopa za slušalice priključena na izlaz pojačala. Na izlaz pojačala snage, koje može imati regulator pojačanja i boje tona, priključuje se zvučnik.

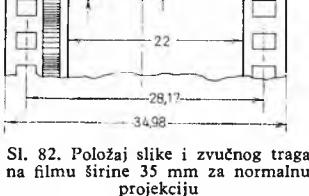
Fotografsko snimanje zvuka

Iako optičko snimanje zvuka ima dobrih strana, ono se zbog složenosti fotografске obrade (razvijanja filma) održalo jedino kod zvučnog filma, gdje se uz sliku na filmsku traku snima i ton, uz potrebnu sinhronizaciju. Međutim, danas se već izrađuju kombinirane filmske trake kojima se slike dobivaju fotografskim postupkom, a ton snima na magnetski sloj koji je nanjet na traci.

Pri snimanju slike film se kreće u skokovima brzinom od 24 slike u sekundi, s pomoći Greifsova sistema, radi eksponiranja. Tonska snimka se pomicće konstantnom brzinom od $45,6 \text{ cm/s}$ i pomaknuta je radi sinhronizacije naprijed za 20 slike. U filmskoj tehnici najčešće se upotrebljava filmska traka širine 35 mm za normalni film, traka širine 16 mm za dokumentarne filmove, a filmovi širine 55 mm za široki ekran (Wide screen, Cinemascop). Na sl. 82 prikazan je položaj slike i tonske snimke na traci širine 35 mm.

Pri svim postupcima fotografskog snimanja zvuka film se pomicće stalnom brzinom i osvjetjava se (eksponira) snopom svjetla kroz uski raspor. Poslije eksponiranja, negativ se razvija i kopira. Eksponirati i razvijati treba dva puta: jedanput negativ i jedanput pozitiv. Najvažniji načini snimanja jesu: intenzitetno snimanje (s promjenljivom gustoćom zacrnjena) i transverzalno snimanje (s promjenljivom zacrnjeno površinom ili širinom zacrnjena).

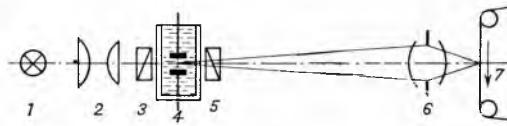
Intenzitetno snimanje zvuka. Pri intenzitetnom postupku tonski se signali snimaju na filmsku traku kao stupnjevi promjene gustoće (gradacije zacrnjena) fotografskog srebrnog sloja, a širina snimke ostaje ista (sl. 82). Budući da je ekspozicija produkt osvjetljenosti i vremena, taj se zapis može dobiti mijenjanjem vremena ekspozicije uz konstantnu osvjetljenost (longitudinalni postupak) ili mijenjanjem osvjetljenosti u ritmu zvučnog vala uz konstantno vrijeme ekspozicije.



Sl. 82. Položaj slike i zvučnog traga na filmu širine 35 mm za normalnu projekciju

Najjednostavniji način da se dobije intenzitetna slika je osvjetljavanje filmske trake kroz pogodni raspor s pomoću *specijalne tinjalice* kojoj je jakost svjetla proporcionalna jakosti tonfrekventne struje.

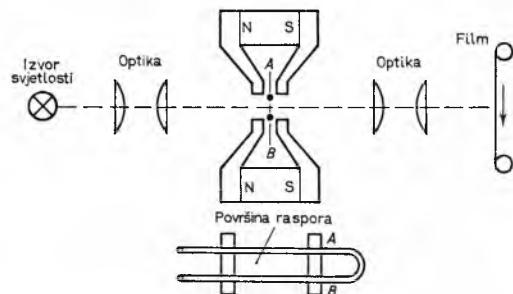
Intenzitetna snimka može se dobiti i s pomoću *Kerrove ćelije* uredajem prikazanim na sl. 83. Snop svjetla iz izvora 1, skupljen kondenzorom 2, prolazi kroz polarizacijski aparat u kojemu se nalazi Kerrova ćelija 4 između polarizatora 3 i analizatora 5, a onda se optikom 6 koncentriira na filmsku traku 7. Ploče kondenzatora Kerrove ćelije zaronjene su u nitrobenzol. Na njih se



Sl. 83. Intenzitetni postupak za snimanje zvuka s pomoću Kerrove ćelije. 1 Izvor svjetla, 2 kondenzor, 3 polarizator, 4 Kerrova ćelija, 5 analizator, 6 optika, 7 film

dovodi istosmjerni i tonfrekventni napon; pod djelovanjem električnog polja koje time nastaje među pločama, nitrobenzol postaje dvoloman i linearno polarizirano svjetlo koje kroz nj prolazi eliptički se polarizira. Nicolova prizma polarizatora, kojom se svjetlo polarizira pod kutom od 45° prema smjeru polja u Kerrovoj ćeliji, i Nicolova prizma u analizatoru ukrštene su pod takvim kutom da kad nema zvuka ni tonskog napona, te nema izmjeničnog električnog polja, kroz polarizacijski aparat s ukrštenim Nicolovim prizmama ne može proći linearno polarizirano svjetlo. Kad se pojavi tonski napon i izmjenično električno polje, uslijed eliptičke polarizacije svjetla analizator propušta svjetlo jakosti proporcionalne tonskom naponu. Time se mijenja osvjetljenost filmske trake u ritmu promjene jakosti tona.

Longitudinalnim postupkom dobiju se promjene gustoće zacrnjena osvjetljenog sloja mijenjanjem širine raspora kroz koji snop svjetla stalne jakosti pada na filmsku traku. U polju magneta

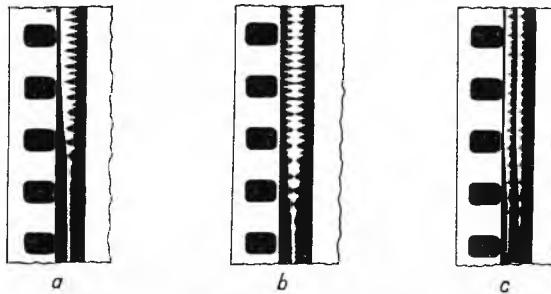


Sl. 84. Longitudinalni postupak snimanja zvuka

nalaze se dvije vrpce (A i B) od vodljiva materijala, kroz koje prolazi tonfrekventna struja. Ovisno o smjeru struje, trake se približavaju jedna drugoj ili se jedna od druge udaljuju. Time se mijenja širina raspora (sl. 84).

Transverzalno snimanje zvuka može biti ili s promjenljivom površinom zacrnjenja ili s promjenljivom širinom zacrnjenja.

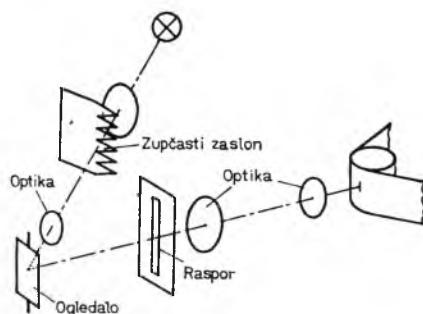
Pri snimanju s promjenljivom površinom zacrnjenja mijenja se površina osvijetljene plohe na traci u ritmu tonskog signala. Osvijetljenost osvijetljenih ploha uvijek je ista, tako da na razvijenom filmu postoje samo neprozirne (crne) i prozirne (bijele) površine. Taj postupak uvelike pojednostavnjuje proces razvijanja i kopiranja. Takav se način snimanja postiže bilo pomicanjem ogledala (kao u zrcalnom galvanometru) bilo pomicanjem zaslona (blende). Postoji više vrsti zapisa s promjenljivom površinom.



Sl. 85. Različne vrste zapisa s promjenljivom površinom. a Zupčasta snimka, b dvostrana snimka s promjenljivom površinom, c višestruka zupčasta snimka

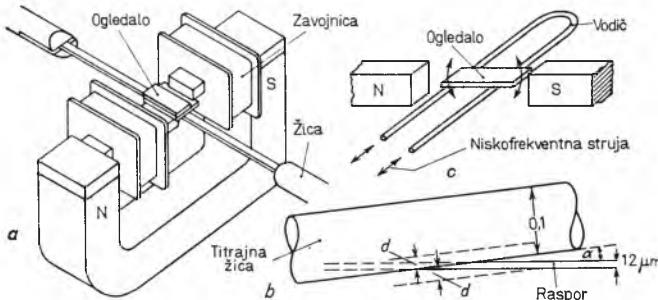
To su: zupčasta snimka, dvostrana snimka s promjenljivom površinom i višestruka zupčasta snimka (sl. 85 a...c).

Na sl. 86 pokazan je način snimanja *zupčaste snimke*. Ogledalo baca svjetlosni snop zupčasta oblika na raspor i on se, ovisno o zakretu ogledala, više ili manje osvjetljuje. Ogledalo titra u



Sl. 86. Snimanje s nepomičnim zaslonom i pomičnim ogledalom

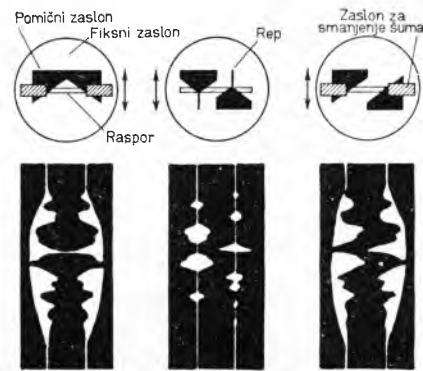
ritmu tonfrekventne struje. Ogledalo ili zaslon pomicu se na elektromagnetskom (sl. 87 a), elektrodinamičkom (sl. 87 c) ili elektrostatickom principu. Raspor može se zaslanjati i titrajućim vodičem (sl. 87 b).



Sl. 87. Različni načini pomicanja ogledala i zaslona. a Elektromagnetsko pomicanje, b elektrodinamičko pomicanje žice kao zaslona, c elektrodinamičko pomicanje ogledala

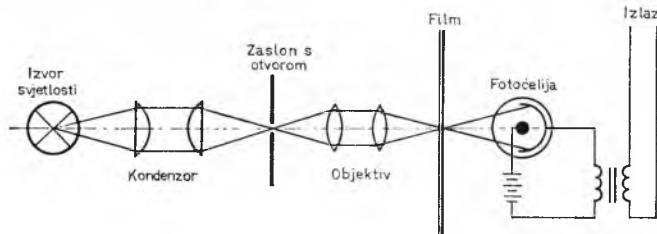
Snimanje s promjenljivom širinom zacrnjenja danas se najčešće primjenjuje. Pri njemu su obje strane zvučne trake modulirane. Pomoću ovog postupka smanjene su smetnje jer je površina neprozirnog veoma mala, a pogodnim izborom klase izlaznog po-

jačala (v. članak *Elektronika*) i oblika zaslona smanjuju se i harmonička izobličenja. Način dobivanja snimke u načelu je isti kao kod zupčaste snimke, samo je drugačiji oblik raspora. Na sl. 88 prikazane su tri snimke s promjenljivom širinom i način dobivanja otvora s tri oblika zaslonskih pločica. Regulacija crnoga vrši se dvjema pločicama, čime se smanjuju smetnje.



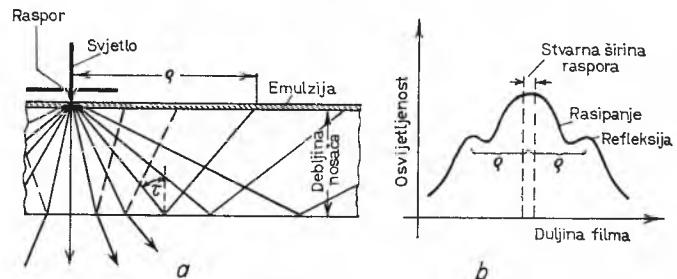
Sl. 88. Snimke s promjenljivom širinom

Reprodukcijski snimljenog zvuka bilo kojim postupkom vrši se s pomoću fotočelije (sl. 89). Snop svjetla iz izvora usmjeruje se kondenzorom na mehanički raspor kroz koji preko objektiva pada na film. Jakost snopa svjetla koji je prošao kroz film i koji osvjetljava fotočeliju razmjerna je prozirnosti filma. Izlazni napon fotočelije proporcionalan je količini svjetlosne energije koja pada na njenu katodu.



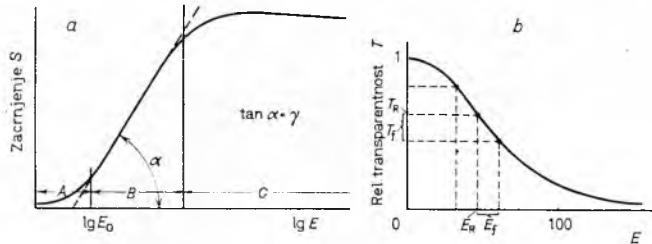
Sl. 89. Princip reprodukcije optički snimljenog signala s pomoću fotočelije

Izobličenja i šumovi pri reprodukciji fotografiski snimljenog zvuka. Zbog efekta raspora kod zupčaste snimke dolazi do nelinearnih izobličenja i povećanja širine. Zbog disperzije svjetla nema oštре granice između svjetle i tamne površine, nego postoji područje sivog, pa je zbog toga efektivni raspor veći od stvarnog. Svjetlosne zrake kojima je kuri upada veći od određene granične vrijednosti ne prolaze kroz film nego se u njemu totalno reflektiraju. *Totalna refleksija* (sl. 90 a) uzrokuje još šire područje sivog. Na sl. 90 b pokazan je udio raznih uzroka proširenja raspora. Osim slabljenja visokih frekvencija zbog efekta raspora, loša fotografска obrada može uzrokovati i nelinearno izobličenje *efekta grmljavine*. Daljim uzrokom izobličenja može biti *koso smješteni raspor*, koji pri intenzitetnom snimanju dovodi do linearnog izobličenja, a pri zupčastoj snimci do nelinearnog izobličenja (npr. od sinusoidnog oblika nastaje pilasti oblik).



Sl. 90. Nastajanje sivog ruba zbog rasipanja i refleksije. a Rasipanje i refleksije u nosiocu emulzije, b stvarno osvjetljavanje filma

U procesu razvijanja i kopiranja kod intenzitetne snimke dolazi zbog zakrivenosti (područje A) krivulje zacrnjenja (gradacije) do nelinearnih izobličenja (sl. 91 a). Da bi signal bio što manje izobličen, treba da se između ekspozicije kopije i snimke задржи linearni odnos. On se postiže ako je ispunjen uvjet $\gamma_s \gamma_k = 1$, gdje γ_s znači strminu krivulje gradacije trake za snimanje, a γ_k strminu krivulje gradacije trake za kopiranje. Krivulja gradacije (sl. 91 a) daje odnos zacrnjenja S i ekspozicije E . Krivulja transparentnosti (sl. 91 b) dobije se iz krivulje gradacije ako se iznosi trans-



Sl. 91. Ovisnost zacrnjenja filma o ekspoziciji (krivulja gradacije a) i ovisnost prozirnosti filma o ekspoziciji (krivulja transparentnosti b)

parencije (propustljivosti) T koji odgovaraju pripadnim vrijednostima zacrnjenja nanesu u linearном mjerilu u koordinatni sistem nad ekspoziciju E .

$$\text{Strmina krivulje gradacije } \gamma = \frac{dS}{d(\log E)}, \text{ zacrnjenje } S = \frac{I_i}{I_u}$$

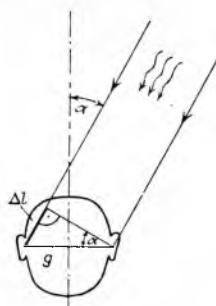
ili, izraženo u decibelima, $S' = 10 \lg \frac{I_i}{I_u}$ dB, gdje I_u i I_i znače jakost upadnog i prenesenog svjetla.

Šumovi koji se pojavljuju pri reprodukciji uzrokovani su nehomogenošću materijala (emulzije, filma) i oštećenjem filma. Najmanji šum daju tamne površine a zatim svjetle; siva mjesta predstavljaju jake izvore šuma.

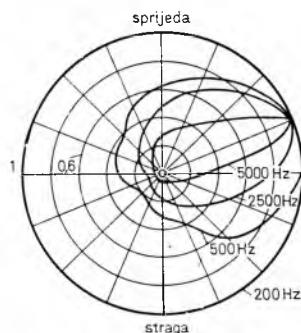
Stereofonija

Pri izravnom slušanju, na primjer, originalne muzičke izvedbe objema ušima (binauralnom slušanju), slušalac može odrediti smjer odakle dolazi zvuk pojedinih muzičkih instrumenata orkestra. Pri jednokanalnoj reprodukciji takve izvedbe, iako je sistem najboljeg kvaliteta, osjet prostornosti nestaje. Tek prostorno vjerno opašanje zvučnog doživljaja, dakle stereofonija, koja se može realizirati sa dva ili više kanala, daje potrebnu vjernost (transparentnost, plastičnost) zvučnog polja u nekom volumenu.

Prostorno lokaliziranje zvuka. Čovjek svakim uhom jedinačno osjeća glasnoću, visinu i boju tona. Međutim, za prostorno lokaliziranje zvuka potrebna su dva uha. Sposobnost binauralnog lokaliziranja zvuka omogućena je razlikom u glasnoći, razlikom u fazi i razlikom u vremenu.



Sl. 92. Razlika duljine zvučnog puta prilikom kosog upada



Sl. 93. Usmjerne karakteristike desnog uha za različite frekvencije

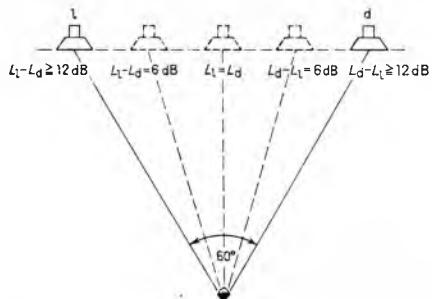
Razlika u glasnoći između osjeta zvuka što ga čovjek prima jednim i drugim uhom posljedica je toga što je zbog zasjenjivanja jakost zvuka s jedne i druge strane glave različita. Kad naime zvučni valovi naidu na zapreku, u ovom slučaju na glavu

i ušnu školjku, oni se ogibaju i reflektiraju. Na sl. 92 prikazan je slučaj kad zvučni valovi dolaze s desne strane iz smjera koji sa simetralom glave slušaoca zatvara kut α . Na sl. 93 prikazane su u polarnom dijagramu usmjerne karakteristike uha, tj. relativne glasnoće što ih osjeća desno uho (pri dolasku zvuka iz različnih smjerova) za frekvencije 200, 500, 2500 i 5000 Hz. Na niskim frekvencijama valna duljina je mnogo veća od dimenzije glave, te u tom frekvencijskom području glava ne predstavlja zapreku, pa nema usmernjeg djelovanja. Ako je promjer glave $g = 20$ cm, kritična valna duljina je 1,6 m, što odgovara frekvenciji 200 Hz. Razlika između jakosti zvuka primljenog lijevom i desnim uhom dolazi, dakle, do izražaja tek kad je frekvencija zvuka viša od 200 Hz. Zahvaljujući upravo ušnoj školjci, koja je zapreka za frekvencije više od 3000 Hz, uho može odrediti da li zvuk dolazi s prednje ili sa stražnje strane. Kod složenog zvuka postoji i razlika u boji zvuka primljenog lijevom i desnim uhom, ovisno o kutu upada, jer se viši harmonici složenog zvuka različito oslabljuju.

Razlike u fazi. Kad zvuk pod određenim kutom dolazi do slušaoca, zvučni val ne stiže do oba uha u isto vrijeme. Pri čistim tonovima to se može prikazati kao razlika u fazi između zvučnih valova koji dolaze na oba uha. Fazna razlika između zvukova što ih uho prima ne ovisi samo o razmaku između ušiju i položaju glave prema izvoru zvuka, već i o frekvenciji. Najbolje lokaliziranje s pomoću fazne razlike postiže se u frekvencijskom području između 200 i 800 Hz.

Vremenska razlika. Zbog razlike u duljini puta podražaj zvuka ne stiže na oba uha u isto vrijeme (v. sl. 92). Ako se sa Δl označi razlika između duljine puta od izvora zvuka do jednog i drugog uha, vrijeme kašnjenja iznosi $\Delta t = \Delta l/c = g \sin \alpha/c$, gdje je c brzina zvuka. Razlika u duljini puta od 1 cm daje vrijeme kašnjenja $\sim 30 \mu\text{s}$. Međutim, u praksi pri određivanju smjera zvuka razlike u jakosti zvuka i vremenske razlike uobičajeno dolaze zajedno, te promjena jedne od tih razlike može mijenjati zvučnu sliku, a djeluje i na drugu. Smjer zvučnog izvora može se lakše odrediti kad je zvuk kompleksan.

Stereo-reprodukacija. Ako se na dva odvojena zvučnika (sl. 94 i d) dovodi u isto vrijeme mono-signal jednak jakosti,



Sl. 94. Shematski prikaz stereo-efekta. Virtualni izvor zvuka pomiče se zbog razlike jakosti zvuka između lijevog (l) i desnog (d) zvučnika

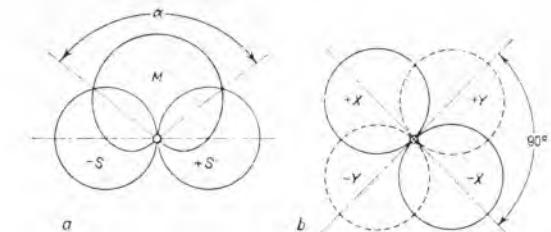
dobit će se dojam da zvuk dolazi iz jednog zvučnog izvora koji je smješten na sredini između zvučnika. Ako se, međutim, pojača signal na jednom zvučniku, taj će se zamišljeni izvor, ovisno o razini jakosti zvuka, seliti prema zvučniku na koji se dovodi jači signal. Ako je razina jakosti zvuka L za 15 do 20 dB viša na jednom zvučniku nego na drugom, zvuk se čuje samo iz njega. To znači da uho u tom slučaju praktički reagira samo na razliku u glasnoći. Taj efekt predstavlja, u stvari, jednu od osnova stereofonske reprodukcije zvuka. Pri tome se pretpostavlja da se slušaoci nalaze u određenoj udaljenosti ispred zvučnika. Šrafirana površina na sl. 95 shematski prikazuje prostor u kome slušalac još osjeća stereo-efekt. Ako je razmak između zvučnika malen, slušalac se mora nalaziti točno u sredini između njih. Kad je razmak između zvučnika prevelik, stereo-efekt se gubi. Najpovoljnije je mjesto za slušanje na vrhu istostraničnog trokuta što ga čine zvučnici i slušalac. Iako vremenske razlike i razlike u boji zvuka pridonose određivanju najpovoljnijeg mjesto za stereofonsko slušanje, razlike jakosti zvuka u stereo-tehnici sasvim su

dovoljne da se postigne stereofonski efekt. Budući da su razlike u glasnoći, ili vremenske razlike, ili obje zajedno, važne za dobivanje prostornog dojma, ta se dva faktora pri reprodukciji ne smiju mijenjati. Pri postavljanju zvučnika valja, dakle, voditi računa o ovome: oba zvučnika moraju biti otprilike na jednakoj udaljenosti od slušaoca, tako da ne može doći ni do kakve vremenske razlike (odstupanja veća od 60 cm kvare stereo-efekta) i osjeta kri-vog smjera; razlika jakosti zvuka između jednog i drugog stereokanala ne smije postojati, tj. oba kanala moraju imati iste karakteristike (npr. pojačanje, snagu); oba zvučnika moraju imati istu frekvencijsku i usmjernu karakteristiku. Nadalje, akustički uvjeti zida na kojemu se nalaze zvučnici treba da budu isti, npr. simetrična difuznost, apsorpcija, itd.

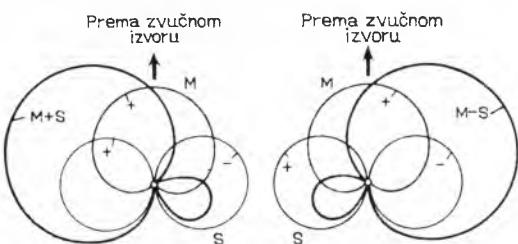
Sistemi stereofonskog snimanja zvuka. U stereo-reprodukcijskom uglavnom su svi problemi riješeni. Hoće li stereoreprodukcijska biti vjerna originalu ili ne, to ovisi najviše o tehnici snimanja. Pri tom treba nastojati da se dobije plastičan ton, a izbjegavati naglašene kontraste lijevo-desno. Zbog toga što danas postoji još mnogo mono-uredaja, od stereofonske se snimke traži kompatibilnost, tj. mogućnost reprodukcije s dobrim kvalitetom i na jednokanalnim uredajima.

Od više do sada predloženih načina stereofonskog snimanja (npr. snimanje s „umjetnom glavom“, AB-stereofonija, intenzitetna stereofonija) danas se primjenjuju samo tzv. postupak *MS* i postupak *XY*, koji su intenzitetne metode, tj. zasnivaju se na razlici jakosti zvuka.

Postupak *MS*. Ovaj način snimanja uveo je danski inženjer H. Lauridsen. *MS* znači (*Mitte*, *Seiten*) da se određuju oba glavna pravca snimanja. Jedan mikrofon, mikrofon *M*, ima bubrežastu usmjernu karakteristiku, a drugi, mikrofon *S*, osmičastu karakteristiku (sl. 96 a). Mikrofoni se postavljaju tako da je kut između osi njihovih karakteristika jednak 90° . Željena razlika



Sl. 96. Usmjerna karakteristika mikrofona pri stereosnimanju: a) pri postupku *MS*, b) pri postupku *XY*



Sl. 97. Usmjerna karakteristika informacije *L* i *D* kao zbroj i razlika karakteristika dvaju mikrofona

jakosti zvuka postiže se ovde upravo različitim usmjernim karakteristikama. Mikrofon *M* sam daje informaciju o tonskom sadržaju zvučne slike, a zajedno sa mikrofonom *S* informaciju o smjeru zvučnih izvora. Da bi se dobio stereofonski efekt, moraju

se informacije dobivene tim postupkom zbrajati i odbijati (sl. 97). Informacije *M* i *S* se preko određenog člana za dobivanje njihove sume i razlike (npr. mosnog spoja) dovode lijevom odnosno desnom zvučniku. U zvučnicima djeluju novonastale kombinacije: *M + S* koja se dovodi lijevom zvučniku (*L* - informacija) i *M - S* koja se dovodi desnom zvučniku (*D*-informacija).

Uzajamno akcionalno simetrične usmjerne karakteristike informacija *L* i *D* dobivaju se iz usmjernih karakteristika obaju mikrofona prema sl. 97 na analogan način kao bubrežasta karakteristika iz krugne i osmičaste prema sl. 28 d. (Zbroj pozitivne i negativne veličine jednak je razlici njihovih apsolutnih vrijednosti, a razlika pozitivne i negativne veličine jednak je zbroju njihovih apsolutnih vrijednosti.)

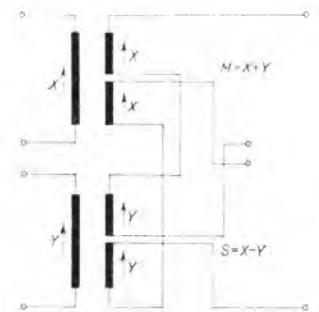
Postupak *XY*. Drugi način intenzitetne stereofonije je postupak *XY*. Dok se pri postupku *MS* upotrebljavaju mikrofoni s različitim usmjernim karakteristikama, u sistemu *XY* mikrofoni imaju iste usmjerne karakteristike, osmičaste, i njihove osi su prema osi snimanja zakrenute za 45° udesno i ulijevo (sl. 96 b). Zvučna informacija koja dolazi s lijeve strane pod kutom od 45° javlja se samo u lijevom kanalu, tj. kanalu *X*, a ako dolazi s desne strane, javlja se u desnom kanalu, tj. kanalu *Y*. Ako se izvor pomiče prema sredini, signal se u jednom kanalu pojačava, a u drugom slabii. Kad zvuk dolazi s prednje strane, oba kanala daju istu jakost zvuka i jednak signal. Slušalac dobiva dojam da se zvučni izvor nalazi u sredini između dva zvučnika. Sličan se efekt dobiva i ako se primijene mikrofoni s kardiodnim karakteristikama.

Postupci *MS* i *XY* među sobom su povezani, te se jednostavnim zbrajanjem i oduzimanjem može prijeći iz jednog sistema u drugi. Naime, vektorska suma i diferencija informacije *MS* daje informaciju *XY*, i obrnuto: $M = X + Y$, $S = X - Y$, gdje je *X* lijeva informacija, *Y* desna informacija, *M* tonska informacija, a *S* informacija smjera.

Kompatibilnost. Informacija *M* u postupku *MS*, odnosno informacija *X + Y* u postupku *XY* omogućuje monofonsku izvedbu, dakle i jedan i drugi sistem imaju svojstvo kompatibilnosti. To se vidi iz karakteristika mikrofona. Zbrajanjem karakteristika mikrofona *X* i mikrofona *Y* dobiva se nova karakteristika, usmjerenja prema osi sistema. To je zapravo karakteristika normalno postavljenog monomikrofona, a upravo takvu karakteristiku ima i mikrofon *M* sistema *MS*. Znači, kako informacija *X + Y* u postupku *XY* tako i informacija *M* u sistemu *MS* sadrže informacije koje bi se dobile i normalnim monomikrofonom. Ako želimo da iz monosignala ponovo dobijemo stereofonsku reprodukciju, moramo imati signal *S*, a to je razlika signala *X* i *Y*, $S = X - Y$. Sam signal *S* ne daje normalnu reprodukciju. Ako se npr. izvor nalazi točno u sredini između mikrofona, tako da je *X* = *Y*, nema signala *S* i ništa se ne čuje. Međutim, signal mora postojati da bi se dobio stereofonski efekt. Signal *X* se dobije kao zbroj a signal *Y* kao razlika signala *M* i *S*, i obrnuto. Postupak se tehnički izvodi mosnim spojem ili s pomoću diferencijalnog transformatora (sl. 98). Ako se na njegov ulaz doveđu signali *X* i *Y*, dobit će se na izlazu signali *M* i *S*, a ako se na ulaz doveđu signali *M* i *S*, na izlazu će se dobiti signali *X* i *Y*. Iz ovog se razmatranja vidi da su i oba sistema među sobom kompatibilni.

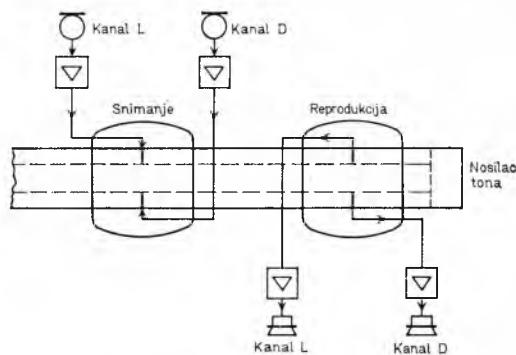
Radi dobivanja kvalitetne stereofonske snimke, postavljaju se određeni zahtjevi elementima za snimanje. Od mikrofona se traži jednakost frekvencijskih i faznih karakteristika, a preslušavanje između kanala ne smije biti veće od dozvoljenog.

Stereofonsko snimanje i reprodukcija magnetskim putem. Snimanje stereo-informacije na nosioca tona vrši se paralelno na dva traga, i to uvjek u tehnici *XY*. Kako se kod jednokanalnog snimanja mogu na jednu vrpcu snimati dva programa na dvije polovine, to odmah nameće mogućnost snimanja dvaju istovremenih kanala na obje polovine vrpce. Na sl. 99 prikazan je princip stereo-snimanja i reprodukcije na dvokanalnom magnetofonu. I



Sl. 98. Shema diferencijalnog transformatora

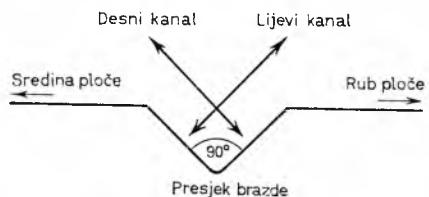
snimanje i reprodukcija izvode se s pomoću dvostrukе magneto-fonske glave, čiji su raspori smješteni jedan iznad drugoga. Time je sinhronizacija signalâ X i Y potpuno osigurana, te ne može doći ni do fazne ni do vremenske razlike. Jakoš stereosnimke mora biti takva da se prilikom reprodukcije stereo-signala na jednokanalnom uređaju dobije normalni nivo mono-signala.



Sl. 99. Načelna shema stereo-snimanja i reprodukcije s pomoću magnetofona

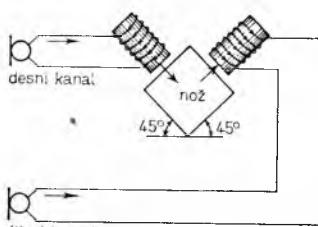
Kompatibilnost stereofonske snimke je potpuna. Reproduciranjem stereosnimke preko monomagnetofona dobit će se monosignal. Ako se monosnimka reproducira stereomagnetofonom, oba kanala reproducirat će isti signal, a slušalac ima utisak da se izvor zvuka nalazi između zvučnikâ.

Stereofonsko snimanje na gramofonske ploče i reproduciranje zvuka s njih. Kako je već spomenuto uvodno u poglavljaju o snimanju i reproduciranju zvuka s pomoću gramofonskih ploča, zvuk se stereofonski snima urezivanjem brazde u ploču jednim nožem i reproducira s ploče jednom iglom. To se postiže time što sila koja uzrokuje titranje noža trokutnog presjeka, a potječe od izlaznih napona dvaju mikrofona, ima dvije komponente: jednu vertikalnu (dubinsku) i jednu horizontalnu (bočnu).



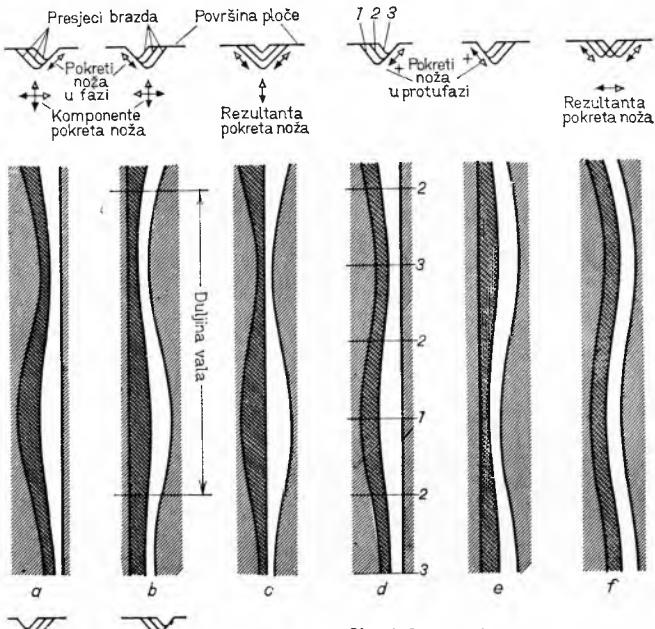
Sl. 100. Princip dvokanalnog stereofonskog snimanja na gramofonsku ploču. Smjerovi kretanja noža pri snimanju po postupku $45^{\circ}/45^{\circ}$

Postoji više metoda stereofonskog urezivanja brazde. Pri jednoj metodi, tzv. dubinsko-bočnom rezu, vertikalna komponenta sile urezivanja potjeće u cijelini od izlaznog napona jednog mikrofona, a horizontalna komponenta u cijelini od izlaznog napona drugog mikrofona, tj. u istoj brazdi se istodobno za registraciju informacije jednog kanala izvodi dubinski rez, a za registraciju informacije drugog kanala bočni rez. Pri drugoj metodi, nazivanoj rez pod 45° , sile koje potječu od izlaznih napona obaju mikrofona ne djeluju izravno u horizontalnom i vertikalnom smjeru, nego pod kutom od 45° prema ravnini površine ploče, okomito na katete trokutnog presjeka noža, pa svaka od njih ima horizontalnu

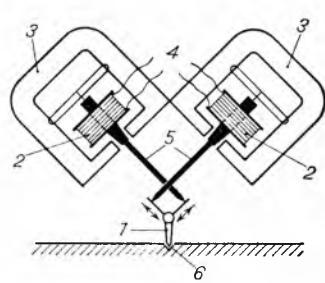


Sl. 101. Načelna shema stereo-glave za snimanje

Na sl. 100 prikazan je osnovni princip dvokanalnog stereofonskog snimanja zvuka na ploče rezom pod 45° , a na sl. 101 data je načelna shema stereo-glave za snimanje zvuka po toj metodi. Na pokretnom sistemu, gdje je nož za urezivanje brazde, nalaze se dvije pobudne zavojnice smještene pod kutom od 45° prema horizontali a s osima okomitim na bok brazde. Protjeće li kroz zavojnicu izmjenična struja, stvara se magnetski tok koji pokreće nož za rezanje u smjeru osi zavojnice. Svaka zavojnica



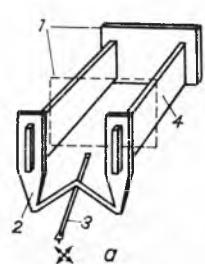
Sl. 102. Urezivanje stereo-brazde



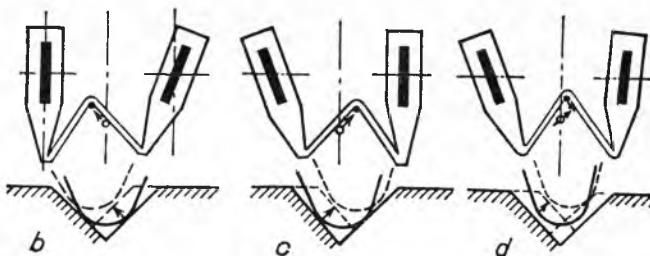
Sl. 103. Elektromagnetska stereozvučnica. 1 Igla, 2 zavojnice, 3 permanentni magneti, 4 priključci za zavojnicu, 5 željezne jezgre, 6 brazda

Pri stereofonskoj reprodukciji zvuka s ploča, igla slijedi zavoje brazde, pri tom joj »opipava« obje stjenke i njihove modulacije prenosi — analogno kao pri urezivanju brazde, ali u suprotnom smjeru — na dva odvojena i neovisno pokretna mehaničko-električna pretvaračka elementa u zvučnicima. Sl. 103 to prikazuje na primjeru elektromagnetske stereozvučnice. Ako je brazda modulirana samo na desnom boku, titranje se igle prenosi samo na lijevu zavojnici zvučnice, ako je brazda modulirana samo na lijevom boku, titranje igle prenosi se samo na desnu zavojnici, a ako je modulirana na oba boka, titraju se jednog kanala prenose na jednu, a titraju drugog kanala na drugu zavojnici.

Sl. 104 prikazuje shematski kristalnu stereofonsku zvučnicu i način kako se njome razdvajaju kanali. Slobodni krajevi piezokristalnih elemenata spojeni su elastičnom spojkom u obliku slova W. Kako pokazuju sl. 104 b i c, ako je brazda modulirana samo na jednom boku, tordira se samo jedan kristal, a ako su



Sl. 104. Kristalna stereo-zvučnica. a Shema stereozvučnice, b-d način djelovanja; 1 ležajevi, 2 elastična spojka, 3 nosač s iglom, 4 kristal



modulirana oba boka (sl. 104 d), tordiraju se oba kristala neovisno jedan od drugog, svaki sam u ritmu svog kanala.

Da bi se kanali stereo-zvučnicom dobro odjeljivali, treba da igla radi pod ispravnim kutom u odnosu prema brazdi i da elementi za jedan i drugi kanal što točnije zatvaraju kut od 90° . Označi li se sa α kut odstupanja od te okomitosti, prigušenje se preslušavanja sa idealne vrijednosti smanjuje na vrijednost $b_p = 20 \lg \cot \alpha / \text{dB}$. Odstupanje od okomitosti elemenata za samo 2° pogoršava prigušenje preslušavanja od propisanog iznosa ($> 50 \text{ dB}$) na 29 dB .

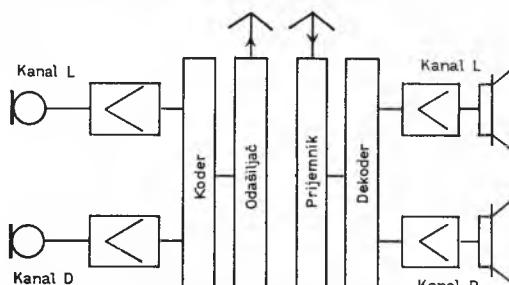
Stereo-zvučnicama se postavljaju i neki posebni zahtjevi. Izlazni napon mora pri jednakom ulazu biti u cijelom frekvencijskom području jednak na oba kanala. (Konstantna razlika među naponima na oba kanala ispravlja se potencijometrom za izjednačenje.) Da bi se dobio što bolji stereo-efekt pri reprodukciji, treba da preslušavaju, tj. prijelaz zvuka iz jednog kanala u drugi, bude što manje. Dozvoljava se, međutim, izvjesno preslušavanje na niskim i visokim frekvencijama, jer su za doživljaj stereo-efekta mjerodavne prvenstveno srednje frekvencije. Najlakše se navedeni zahtjevi mogu ispuniti magnetskom zvučnicom.

Stereo-zvučnicom mogu se reproducirati i mono-ploče. Kako je kod tih ploča izveden bočni rez, to se u smjeru pod 45° prema ploči dobiva za $\sqrt{2}$ manji napon nego kod normalne jednokanalne zvučnice. Ako se, međutim, spoje oba kanala stereo-zvučnice, naponi se sumiraju pa se dobiva veći izlazni napon. Ujedno se dobiva stereo-reprodukcijski kanal koji je izvor zvuka u sredini. Znači, kompatibilnost je ovdje moguća.

Radio-stereofonski prijenos.

Osnovni zahtjev koji se postavlja radio-stereofonskom prijenosu jest kompatibilnost. Za stereo-prijenos primjenjuju se UKV-odašiljač s frekventnom

modulacijom, a kao postupak prihvaćen je sistem suma-diferencija. Val nosilac odašiljača modulira se multipleksnim signalom koji sadrži uz glavni signal sa sumom lijeve i desne zvučne informacije $L + D$ (30 Hz–15 kHz) također tzv. pilot-signal na 19 kHz i pomoći kanal (informaciju smjera) s razlikom $L - D$ (23–53 kHz). Pomoći se kanal formira u kodera tako da se pomoći val nosilac (38 kHz) amplitudno modulira razlikom



Sl. 105. Blok-sHEMA stereofonskog radio-prijenos-a i prijem-a

$L - D$, a zatim potisne i ne prenosi dalje. U prijemniku se frekventno modulirani signal najprije demodulira i zatim privodi dekoderu. Tu se pomoći signalu dodaje val nosilac dobiven udvostrućenjem frekvencije pilot-signala ($2 \times 19 = 38 \text{ kHz}$). Nakon njegove amplitudne demodulacije zbrajaju se jedan s drugim i odbijaju jedan od drugog glavni signal ($L + D$) i pomoći signal ($L - D$). Time se dobiva lijeva zvučna informacija ($2L$) i desna zvučna informacija ($2D$), koje se nakon odvojenog pojačanja privode pripadnom zvučniku.

Kompatibilnost je osigurana jer mono-prijemnik može primiti samo glavni kanal (30 Hz–15 kHz), koji sadrži kompletну zvučnu informaciju, a ne i pomoći kanal (v. Elektronika, uređaji).

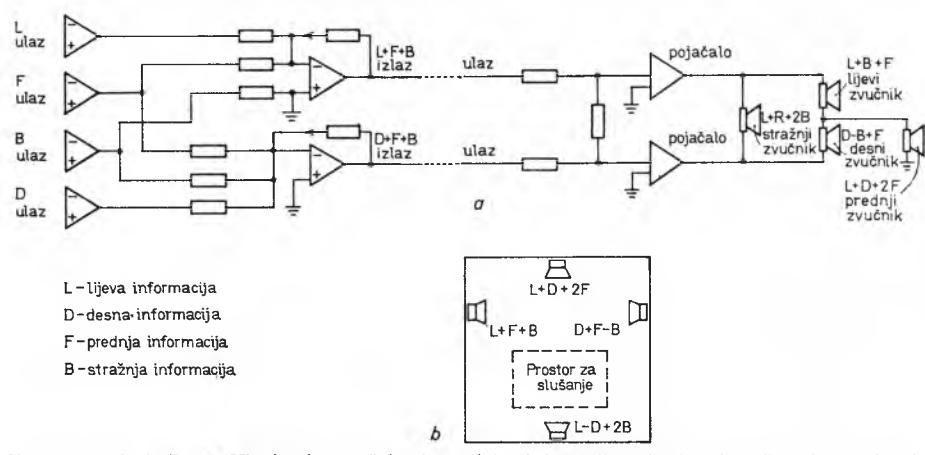
Na sl. 105 prikazana je blok-sHEMA odašiljanja i prijema stereosignala. Na odašiljačkoj strani u kodera se obje stereoinformacije utiskuju u frekventno modulirani val nosilac, a na prijemnoj strani se u dekoderu demoduliraju i razdvajaju.

Kvadrofonija kao četverokanalni sistem daje osim prostornog rasporeda zvučne slike lijevo-desno i njezin raspored po dubini, te omogućuje da se sačuvaju akustička svojstva koncertne dvorane ili prostora u kome je izvršeno snimanje.

Slušalac reproducirao koncerta čuje npr. da muzika dolazi odosprijed, a aplauz odostrag, kao da sjedi u prvom redu sjedala.

Dobar četverokanalni sistem treba da je kompatibilan za mono- i stereo prijenos, treba reproducirati zvuk iz svih smjera prostora, mora omogućiti korištenje ploča, vrpci, frekvencijski moduliranog radio-prijenosu i biti ekonomičan. Danas postoji više četverokanalnih sistema (QART, Dynaco, Dorren itd.), ali nijedan još nije standardiziran.

Kvadrofonijski sistem upotrebljava dva normalna stereokanala, a način dobivanja informacija prikazan je na sl. 106 a. Iako se u današnjoj tehnici snimanja prostornog zvuka primjenjuje mnogo kanala, radi jednostavnosti prikazan je ovdje četverokanalni.



Sl. 106. Kvadrofonija. a) Ubacivanje stražnjeg i prednjeg informacija pri snimanju u lijevi i desni kanal, b) način reprodukcije i raspored zvučnika

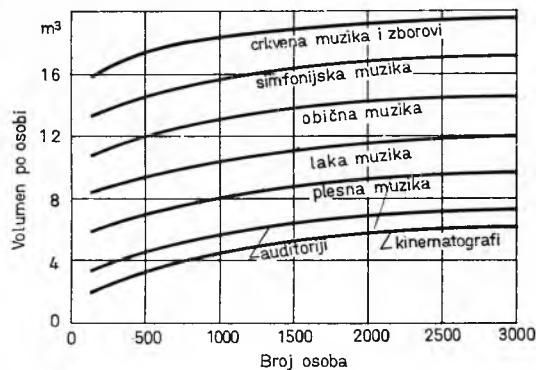
kanalni sistem s pomoću kojeg se dobiju: L — lijeva, D — desna, F — prednja i B — stražnja informacija. Ovi se kanali kombiniraju tako da se na izlazu dvokanalnog sistema dobiju informacije $L + F + B$ i $D + F - B$. Informacije L i B dobiju se postavljanjem mikrofona na lijevu i desnu stranu orkestra, informacija F postavljanjem mikrofona u sredinu ispred orkestra, informacija B (koja daje svojstva dvorane) postavljanjem mikrofona prema dnu dvorane. Sl. 106a prikazuje električni sklop kojim se prilikom reprodukcije iz signala $L + B + F$ i $D - B + F$ dobiju zbrajanjem i odbijanjem ostale potrebne informacije. Raspored zvučnika dan je na sl. 106b. Zvučnik ispred prostora slušanja pobudivan je sumom signalâ, zvučnik iza prostora slušanja razlikom, a lijevi i desni zvučnik napajani su izravno svaki iz jednog osnovnog kanala. Ovaj način kvadrofonije kompatibilan je za stereo-reprodukciu, a nešto složeniji sistem QART kompatibilan je za sve sisteme.

PROSTORNA AKUSTIKA

Arhitektonska akustika, koja je ukratko s čisto akustičkim gledišta obradena u članku *Akustika*, TE 1, str. 67, značajna je i sa gledišta elektroakustike jer se danas u velikim prostorijama (koncertnim, kinematografskim, sportskim i drugim dvoranama), osim direktnog zvučnog prijenosa, sve više primjenjuje i elektroakustički prijenos uz primjenu prikladnog ozvučenja tih sala. Zbog toga je važno da se uoče osnovni problemi o kojima treba voditi računa pri ozvučenju i sredstva koja stoe na raspolažanju za akustičku obradu već postojećih prostorija.

Zadatak je arhitektonske akustike da u prostoriji stvoriti uvjete za dobro slušanje. Dobru akustiku dvorane osiguravaju ovi uvjeti: u prostoriji ne smije biti ni unutarnje ni vanjske buke; razina glasnoće zvuka mora biti približno jednaka na svim mjestima, a zvuk treba da bude dovoljno glasan; u prostoriji ne smije doći do neželjenih rezonancija; odjek (v. dalje) ne smije biti prevelik ni premalen; u prostoriji ne smije ni na kojem mjestu doći do pojave više uzastopnih odvojenih jeka (engl. flutter echo). Važni faktori o kojima ovise akustička svojstva neke određene prostorije jesu volumen, oblik i odjek.

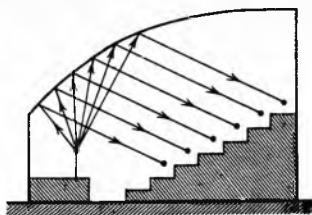
Volumen prostorije. Svakom izvoru zvuka odgovara određen volumen prostorije; povećanjem volumena povećava se unutarnja površina (apsorpcija zvuka), pa je uz istu isijanu akustičku snagu razina glasnoće manja. Osnova za određivanje volumena koncertnih dvorana jest specifični volumen, tj. volumen po slušaocu. Optimalni specifični volumen iznosi $7\text{--}8 \text{ m}^3$ po osobi. Dijagram na sl. 107 prikazuje ovisnost specifičnog volumena o broju slušalaca za različite vrste glazbe.



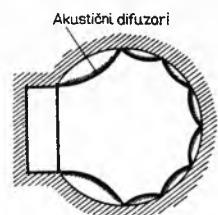
Sl. 107. Potreban specifični volumen velikih dvorana za različite vrste glazbe i određeni broj slušalaca

Oblik prostorije. Akustička svojstva prostorije ovise u velikoj mjeri o njenom obliku. Akustički nedostatak koji nastaje zbog neprikladnog oblika ponekad je nemoguće ukloniti. To se odnosi na sve plohe prostorije: pod, strop i bočne zidove. Svaka je prostorija složeni rezonantni sistem (v. *Akustika*, TE 1, str. 67), pa zbog rezonantnih pojava (stojnih valova) dolazi do nejednolike raspodjele zvučnog tlaka. Jedan od najvažnijih uvjeta za dobru raspodjelu zvuka u nekoj prostoriji jest da zvuk dolazi do željenog mesta što kraćim putem. Prostorije oblika trapeza pogodne su

zbog refleksije, a kružni oblici su nepovoljni. Oblik i visinu stropa valja iskoristiti, jer je strop ona ploha koja najviše pridonosi pojačanju zvuka (sl. 108). Upotrebom reflektora može se zvuk na stražnjim sjedalima pojačati, a upotrebom difuzora (raspršivača zvučnih valova, sl. 109) postiže se difuzija zvučnih valova u prostoriji.



Sl. 108. Iskorišćenje stropa za pojačanje jakosti zvuka na udaljenim sjedalima



Sl. 109. Akustički difuzori

Odjek (reverberacija) je eksponencijalno opadanje jakosti zvuka (ili zvučnog tlaka) nakon što prestane djelovati izvor zvuka.

Ako neki izvor zvuka (npr. zvučnik stalne akustičke snage P_a) proizvodi u zatvorenoj prostoriji akustičku energiju kroz period vremena dovoljno dug za promatranje, jedan se dio te energije, odgovarajući snazi P_r , reflektira od zidova i predmetâ, a drugi dio, odgovarajući snazi P_d , na njima se apsorbira. Apsorbirani dio snage proporcionalan je ukupnoj snazi P_d zvučnih valova koji udaraju u zidove i predmete prostorije (kako onih koji dolaze izvorno iz izvora tako i onih koji su već odnekuda reflektirani):

$$P_d = \alpha P_a. \quad (14)$$

Konstanta proporcionalnosti je koeficijent apsorpcije $\alpha = P_d/P_a$. Gustoća akustičke energije (energija po jedinici volumena) nakon uključenja izvora zvuka postepeno raste jer se snaga P_a zvučnih valova izvora nastavlja pribajati snazi reflektiranih valova koji se već nalaze u prostoriji. Istovremeno s porastom ukupne akustičke snage P_d u prostoriji raste prema jedn. (14) i snaga apsorbiranih valova. U trenutku kad apsorbirana snaga tako rastući postane jednakna snazi zvučnog izvora, prestaje porast gustoće akustičke energije u prostoriji. Porast gustoće energije u intervalu vremena od trenutka uključenja izvora do prestanka porasta gustoće energije u prostoriji zove se *dovzvuk*. Sasvim analogno, nakon isključenja izvora zvuka, gustoća energije koja od njega potječe opada postepeno do nule; ta se pojava zove *odjek* (reverberacija). Porast i opadanje gustoće energije za vrijeme dozvuka i odjeka (a prema tome također porast i opadanje jakosti zvuka) eksponencijalni su i izraženi jednadžbama

$$I = I_0 e^{-bt} \text{ za opadanje, } I = I_0 (1 - e^{-bt}) \text{ za porast.} \quad (15)$$

Ako se sa E označi gustoća energije zvučnog polja u određenom trenutku, sa V volumen prostorije, sa c brzinu širenja zvuka i sa A tzv. ukupnu apsorpciju na zidovima i predmetima prostorije (jednaka umnošku prosječnog koeficijenta apsorpcije zvuka i ukupne površine zidova i predmetâ), bit će bilanca snage izražena diferencijalnom jednadžbom

$$\frac{dE}{dt} + \frac{cA}{4} = P_a,$$

gdje prvi član na lijevoj strani predstavlja snagu zvučnog polja (P_d), a drugi član apsorbiranu snagu. Integracija te jednadžbe daje

$$E = \frac{4 P_a}{c A} \left(1 - e^{-cAt/4V} \right). \quad (16)$$

U trenutku uključenja izvora zvuka, $t = 0$, $E = 0$; kad s porastom t do vrijednosti trajanja odjeka T uključenje izvora zvuka, $t = T$, $E = E_0$ (vrijednost u trenutku uključenja), a $E/T = cA/4V$ (vrijednost u trenutku uključenja). Tako se dobija jednadžba (16).

$$E_0 = \frac{4 P_a}{c A}. \quad (17)$$

U trenutku kad se isključi izvor zvuka postane $P_d = 0$, i prema tome

$$E = \frac{4 P_a}{c A} e^{-cAt/4V} = E_0 e^{-cAt/4V}. \quad (18)$$

S porastom t do vrijednosti trajanja odjeka, drugi faktor s desne strane postane ≈ 0 , te isčezava i E . Kao trajanje odjeka T uzima se ono vrijeme t za koje gustoća energije padne na jednu miliontinu svoje početne vrijednosti, tj. za 60 dB . Sa $E/E_0 = 10^{-6}$ slijedi iz jedn. (18)

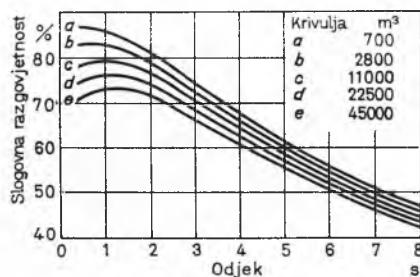
$$T = \frac{k V}{A}, \quad (19)$$

gdje je $k = 0,161 \text{ s/cm}$.

Ako se u jedn. (16) i (18) postavi $cA/4V = b$, a umjesto gustoće energije E i E_0 pišu jakosti zvuka I i I_0 (koje se od njih razlikuju samo za konstantan faktor), dobije se jednadžba (15).

Zbog logaritmičke ovisnosti (subjektivne) glasnoće od (objektivne) jakosti zvuka, porast glasnoće nakon uključenja izvora zvuka

mnogo je naglijji nego porast jakosti zvuka, a opadanje glasnoće manje nego opadanje jakosti zvuka. Stoga uho osjeća odjek mnogo jače nego dozvuk, te odjek u velikoj mjeri utječe na kvalitet muzičke izvedbe i govora u zatvorenoj prostoriji (v. *Akustika*, TE 1, str. 68). Na sl. 110 prikazana je sloganova razgovjetnost govora u ovisnosti o odjeku za prostorije različitog volumena.



Sl. 110. Slogovna razgovjetnost u ovisnosti o vremenu odjeka

Slogovna se razgovjetnost utvrđuje prema broju ispravno (sluhom) primljenih slogova bez jezičnog značenja koji se pod određenim uvjetima diktiraju u ispitivanoj prostoriji.

Sredstva za apsorpciju zvuka. Mada svi materijali u nekoj prostoriji (tj. zidovi, sjedišta, pod) apsorbiraju određenu količinu akustičke energije, akustička se svojstva velikih prostorija mogu mijenjati u širokim granicama samo primjenom odgovarajućih dodatnih sredstava za apsorpciju zvuka. Tim se sredstvima može skratiti vrijeme odjeka, otkloniti jeka i prigušiti buku. Ona se mogu podijeliti u tri grupe: u porozne, membranske i rezonatorske apsorbere.

Porozni apsorberi su tekstilni proizvodi od vune, pamuka, svile, mineralne vune, strugotine drveta i slično, kojima se oblažu zidovi i strop. Do apsorpcije zvuka dolazi time što se energija titranja zraka u porama, potaknutog od zvuka na titranje, zbog trenja o stijenke pretvara u toplinu.

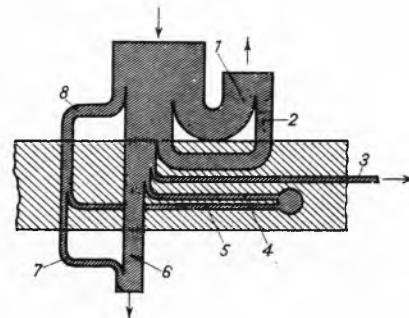
Membranski apsorberi. Na konstrukciju letava pričvrsti se tanka ploča od drveta, ljepenke, kože ili slično. Ploča pod utjecajem zvuka titra, i to najjače u blizini vlastite rezonancije. Uz pretpostavku da je ploča tanka, osnovna rezonantna frekvencija dobije se (u Hz) iz brojčane formule $f_r = 600 \sqrt{\frac{1}{Md}}$, gdje je M masa ploče u kg/m^2 , a d debljina zračnog jastuka u cm. Apsorbirana energija pretvara se zbog unutarnjeg trenja u toplinu.

Rezonatorski apsorberi su akustički (Helmholtzovi) rezonatori, tj. kutije s okruglim otvorom. Rezonantna se frekvencija dobije po formuli $f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l_k V}}$, gdje je S presjek otvora, V volumen kutije, c brzina širenja zvuka u zraku, a l_k korigirana duljina otvora ($l_k = l + 1,57 r$, gdje je r polujer otvora). Akustički se rezonatori primjenjuju pojedinačno ili kao spojeni rezonatorski sistemi. Apsorbirana energija jednim dijelom se ponovo isijava, a drugim dijelom pretvara u toplinu zbog trenja čestica uzduha o stijenke otvora i u poroznom materijalu kojim je obložena kutija.

Buka i vibracije. Prema definiciji, buka je neželjeni zvuk. Ona danas postaje sve veći problem jer se sve više povećava, zbog sve veće mehanizacije u industriji i transportu i zbog sve veće koncentracije stanovništva na pojedinim mjestima. Ista razina buke ne predstavlja uvijek istu subjektivnu smetnju za određene slušaoce. Čak i kad su tonovi čisti, sinusoidni, postoji razlika između glasnoće i stupnja podnošljivosti. Dublji tonovi manje smetaju nego visoki. Mjerenjima i ispitivanjima se ustanovalo da buka smanjuje radnu sposobnost, a medicinska su istraživanja pokazala da buka utječe na krvni tlak i san, a ako kroz dulje vrijeme prelazi razinu 80–90 dB, izaziva djelomični gubitak slaha. Dok buku čovjek prima samo uhom, potresanje prima s više organa istodobno. Pri tome se razlikuju oscilacije, potresanja uslijed kojih se giba cijelo tijelo, i vibracije, titranja u kojima ne sudjeluje cijelo tijelo, ali je ono podvrgnuto neujednačenim pomacima. Osjetljivost prema potresanju ovisi o osobi, položaju osobe i smjeru potresanja. Mjere i sredstva u borbi protiv buke ovise o načinu prenošenja buke do

mjesta na kojem smeta. U tom pogledu razlikuju se tri vrste buke: buka koja se stvara u prostoriji (razgovorom, strojevima itd.), buka koja dolazi izvana ili iz druge prostorije preko zraka, vibraciona buka koja se prenosi preko građevinskih konstrukcija. Kao što se u javnim dvoranama poduzimaju različite mjere radi poboljšanja njihovih akustičkih karakteristika, tako se te prostorije moraju zaštiti i od unutarnje i vanjske buke.

Akustičke izolacije. Na sl. 111 pokazano je kako se dijeli akustička energija zvučnog vala koji dolazi na zid. Dio 1 reflektira se i vraća u prostoriju. Isto tako vraća se dio energije 2 koji zid isijava titrajući kao membrana. Dio energije 3 širi se kroz pore duž zida. Dio 4 i 5 pretvara se u zidu pretvarajući se u toplinu. Dio energije 6 koji je izravno prošao kroz zid i dio 7 koji je prošao kroz zid porama, prelaze u susjednu prostoriju. Za određivanje zvučne izolacije važan je samo onaj dio energije koji prolazi kroz zid. Zvučna propustljivost definirana je jednadžbom $q = P_2/P_1$, a prigušenje u zidu $R = 10 \lg (1/q) = 10 \lg (P_1/P_2)$ dB, odnosno $R = 20 \log (p_1/p_2)$ dB, gdje P_1 i P_2 znače odlazeći i dolazeći zvučnu snagu, a p_1 i p_2 zvučni tlak na dolaznoj i odlaznoj strani.



Sl. 111. Raspodjela akustičke energije koja udara u zid. 1 Refleksija na površini, 2 refleksija iz unutrašnjosti zbog titranja zida, 3 širenje duž zida kroz pore, 4 i 5 pretvaranje u toplinu u zidu, 6 i 7 prelaz u susjednu prostoriju, 8 širenje kroz pore

Poznavajući veličinu R može se izračunati koliko će akustičke energije preći iz jedne prostorije u drugu. Zvučno gušenje zida dano je izrazom $R = (14 + 14 \lg M)$ dB, gdje M znači masu zida po m^2 u kg . Prema tome, debljina punog zida nije važna za određivanje zvučne izolacije, nego samo njegova masa.

Ozvučavanje

Zadatak ozvučavanja jest osigurati potrebnu razinu jakosti zvuka svagdje u određenom prostoru.

Ozvučavanje obuhvaća izbor vrste i snage zvučnika, izbor zvučnog pojačala i, konačno, postavljanje zvučnika na najpovoljnije mjesto radi podjednake raspodjele zvučne energije i pravilnog usmjerenja zvuka. Slobodni i zatvoreni prostor različito se ozvučavaju jer je različit način širenja zvuka u njima. Na otvorenom se prostoru ne uzima u obzir reflektirani zvuk, pri ozvučavanju prostorija, naprotiv, s njime se i te kako mora računati. Zadatak se postavlja drukčije ako zvučnik treba da bude jedini izvor zvuka (npr. u kino-dvorani) nego kad je on samo pomoćno sredstvo za dodatno pojačanje zvuka (pjevača, govornika itd.). U potonjem se slučaju zvučnik redovito postavlja u blizinu mikrofona, kako bi zvuk dolazio slušaocima iz pravog smjera.

Ozvučavanje zatvorenog prostora. Ako se u jedn. (17) gustoća energije E_0 zamijeni zvučnim tlakom p s pomoću jednadžbe

$$E_0 = \frac{I}{c} = \frac{p^2}{\rho_0 c^2},$$

a ukupna apsorpcija A vremenom odjeka T s pomoću jednadžbe (19), dobije se da akustička snaga zvučnika koja je potrebna da bi se u prostoriji volumena V i s odjekom T postigao zvučni tlak p iznosi

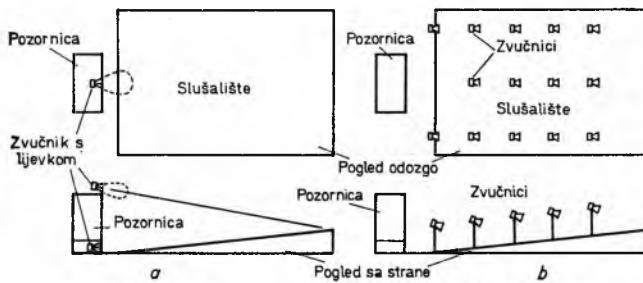
$$P_* \approx \frac{10^{-4} V}{T} p^2.$$

Prema tome, da bi se mogla izračunati potrebna električna snaga

zvučnika, mora se znati razina zvučnog tlaka L_p koju u prostoru treba postići. Ovisno o vrsti prostorije i buci propisane su određene razine: 84 dB za mirne prostorije, 92 dB za prostorije s izvjesnom bukom i 98 dB za sportske i koncertne dvorane. Iz dobivenih akustičkih snaga i korisnosti η zvučnika dobije se potrebna električna snaga pojačala: $P_s = P_a/\eta$. Za ozvučavanje zatvorenog prostora potrebna je relativno mala snaga, pa izvor te snage ne predstavlja problem, nego treba koncentrirati pažnju na kvalitet zvučnika.

Ozvučavanje slobodnog prostora. Pri ozvučavanju slobodnog prostora treba voditi računa o dometu i gubicima koji nastaju prilikom prijenosa zvuka (gubici zbog širenja, utjecaj vremenskih prilika i apsorpcija zraka). Uobičajene razine zvučnog tlaka za ozvučavanje slobodnog prostora jesu: 74 dB za mirni prostor, 84 dB za prostor s izvjesnom bukom i 86 dB za prostor s bučnom okolinom. Potrebna razina zvučnog tlaka na slobodnom je prostoru dakle manja nego u zatvorenom, ali je za postizanje te razine potrebna znatno veća snaga.

Ozvučavanje slobodnog prostora (kao i zatvorenog) može se izvesti na dva načina: centralno i sektorski. Pri centralnom ozvučavanju (sl. 112 a) zvučnici se nalaze na jednom mjestu, tako da slušaoci dobivaju dojam da zvuk dolazi od izvođača. Kod sektorskog ozvučavanja (sl. 112 b) površina koja se ozvučava treba da se podijeli na više sektora.



Sl. 112. Ozvučenje otvorenog prostora: a) centralno, b) sektorsko

Akustičko povratno djelovanje (akustička reakcija). Ako je zvučni tlak što ga proizvodi zvučnik na mjestu gdje se nalazi mikrofon veći od zvučnog tlaka koji proizvodi govornik ili šum, doći će do pojačavanja prvobitnog tlaka pred mikrofonom. To će opet dovesti do pojačanja snage zvučnika itd., i na kraju do osciliranja elektroakustičkog sistema mikrofon-pojačalo-zvučnik, koje se očituje kao zviždanje na frekvenciji na koju je ispunjen uvjet oscilacije. U slobodnom se prostoru ova pojava može izbjegi udaljavanjem mikrofona od zvučnika i izborom pogodne usmjerne karakteristike mikrofona. U zatvorenom prostoru, gdje su zbog refleksija prilike mnogo nepovoljnije, može se akustičko povratno djelovanje sprječiti upotrebom zvučnih stupova i mikrofona s pogodnim usmernim karakteristikama.

PODVODNA AKUSTIKA

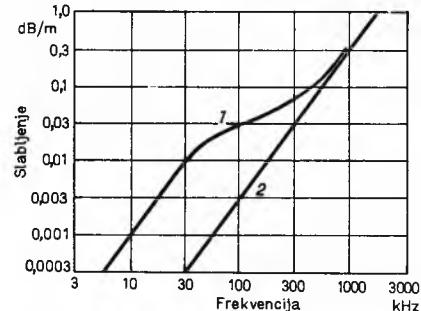
Sirenje zvuka u vodi vrlo je važno za tehniku podvodnih telekomunikacija. Iako nema bitnih razlika u načinu širenja zvuka u zraku i vodi, postoje ipak svojstva karakteristična naročito za morsku vodu u kojoj se uglavnom i vrše podvodne komunikacije.

Akustičke karakteristike morske vode. Brzina zvuka u vodi iznosi pod normalnim uvjetima 1500 m/s. Za točno izračunavanje brzine zvuka u temperaturnom području od 6 do 17 °C može se upotrijebiti empirijska formula: $c = 1410 + 4,21 t - 0,037 t^2 + 1,14 s + 0,018 d$, u kojoj c znači brzinu zvuka u m/s, t temperaturu u °C, s slanost (salinitet) u ‰ i d dubinu u m. Temperatura mora različita je na različnim dubinama, ovisno o prirodnom miješanju vode, insolaciji i drugim meteoroškim prilikama, o strujama i sl. Ona po pravilu s dubinom opada, ali može ponekad i rasti. Budući da brzina zvuka uglavnom ovisi o temperaturi vode, ona je u slojevima različitih temperatura različna, što znatno utječe na širenje zvučnih valova u vodi.

Akustički (valni) otpor vode ($Z_c = \rho c$) je ~ 3700 puta veći od otpora zraka i iznosi $Z_c = 15,35 \cdot 10^6$ Ns/m². Kao nulta razina

tlaka u vodi uzima se $p_0 = 10 \text{ N/m}^2 = 1 \mu\text{bar}$, odnosno kao nulta razina jakosti zvuka, $I_0 = p_0/\rho c = 6,5 \cdot 10^{-18} \text{ W/m}^2 = 6,5 \cdot 10^{-8} \text{ W/cm}^2$, što važi za definirane okolnosti. Vrijednosti P_0 i I_0 odgovaraju prosječnoj razine šumova u morskoj vodi i predstavljaju granicu čujnosti korisnog podvodnog zvuka.

Slabljenje jakosti zvuka u vodi dano je za ravni val formulom $I = I_p \cdot 10^{-ax/10}$, gdje je I_p početni intenzitet, x prevaljeni put i a koeficijent gušenja, koji za čistu vodu iznosi $a = 2,08 \cdot 10^{-18} f^2 \text{ dB/cm}$ (f je frekvencija). Na sl. 113 dana je karakteristika slabljenja zvuka u morskoj vodi (1) i u običnoj vodi (2).



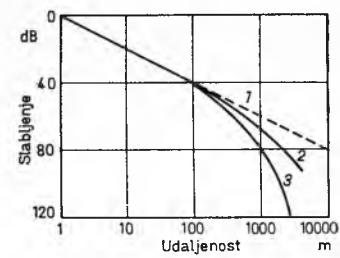
Sl. 113. Karakteristika slabljenja zvuka u morskoj vodi (1) i u običnoj vodi (2)

Ristika slabljenja zvuka u morskoj (1) i u običnoj vodi (2) iz koje se vidi da je slabljenje na nižim frekvencijama mnogo manje nego na višim. Međutim, ako je posrijedi kuglasti ili cilindrični val, valja uzeti u obzir i opadanje jakosti zvuka s udaljenosću, pa dobijemo $I = \frac{I_p}{x^2} \cdot 10^{-ax/10}$, gdje je I_p jakost zvuka na jediničnoj udaljenosti za $a = 0$. Za odnos I/I_0 u dB vrijedi relacija

$$10 \log \frac{I}{I_0} = -20 \log x - ax = n.$$

Na manjim udaljenostima od izvora značajno je slabljenje uslijed radikalnog širenja zvučnih valova (sl. 114 krivulja 1), a tek na većim udaljenostima i višim frekvencijama dolazi do izražaja eksponent $ax/10$, te nastaje slabljenje zbog apsorpcije sredine (krivulja 2). Dalje slabljenje nastaje ako se zvučni valovi lome uslijed promjene brzine zvuka u slojevima različitih temperatura (krivulja 3).

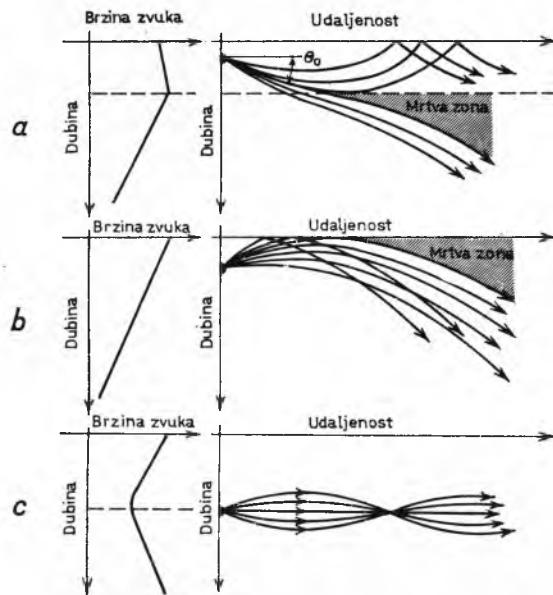
Brzina zvuka u vodi raste s porastom temperature. Budući da se temperatura s dubinom mijenja, i brzina zvuka na različitim je dubinama različita, pa stoga dolazi do lomljenja zvučne putanje. Raspored temperatura može biti vrlo različit. Pri pozitivnom gradijentu brzine, putanja valova se savija prema gore (sl. 115 a), pri negativnom gradijentu, prema dnu (sl. 115 a, b). Osim toga se zvuk još reflektira od površine i od dna. Zbog svih utjecaja dolazi do stvaranja »mrтvih zona« ili »zvučnih sjena« (sl. 115 a, b) u kojima je zvuk zbog loma veoma oslabljen, tako da je prijem podvodnih signala u tom području veoma slab. Pri izračunavanju slabljenja, te pojave treba uzeti u obzir. Na granici temperaturnih slojeva gdje negativni gradijent brzine prelazi u pozitivni gradijent (sl. 115 c), dolazi do formiranja tzv. zvučnih kanala iz kojih zvučni valovi ne mogu izaći jer kanal djeluje kao akustički valovod. Takvi se kanali formiraju povremeno i na manjim dubinama i razlog su neočekivano velikim dometima. Međutim, u oceanima takvi kanali, dugi i do 3000 km, stalno su prisutni na dubini oko 1000 m. Na toj se činjenici zasniva rad sistema za spasavanje posada palih aviona SOFAR (skraćenica engl. SOund Fixing And Ranging), kojim se s pomoću zvuka izazvanog eksplozijom određuje pozicija aviona. I u vodi treba voditi još računa o odnosu signal-šum i o odjeku.



Sl. 114. Slabljenje jakosti zvuka pri propirjanju kroz vodu: 1) samo uslijed radikalnog širenja zvuka, 2) ako se uzme u obzir i apsorpciju, 3) ako se uzme u obzir i anomalije pri prijenosu

Šumovi koji se javljaju u vodi jesu: šum mora uzrokovani vjetrom i kišom, biološki šum izazvan morskom faunom i šum uzrokovani morskim saobraćajem (npr. brodskim vijčima), koji može doći i do 20 dB.

Odjek se pojavljuje zbog refleksije zvuka od mjeđurâ plina, od životinja, biljaka itd. (u čistoj vodi ne bi došlo do odjeka već do jeke). Intenzitet reflektiranog zvuka ovisi o snazi emitera, te o gustoći i veličini reflektirajućih elemenata. Ovi odjeci (reverberacije) predstavljaju znatnu smetnju pri radu s podvodnim akustičkim uređajima.



Sl. 115. Sirene zvuka u vodi pri različitim temperaturnim uvjetima:
a) kad se u dubini pozitivni gradijent brzine zvuka pretvara u negativni gradijent, b) kad je gradijent brzine negativan, c) kad u dubini negativni gradijent postaje pozitivan (stvaranje zvučnog kanala)

Podvodni elektroakustički pretvarači konstruktivno se znatno razlikuju od akustičkih pretvarača u zraku. Zbog toga što je akustički otpor $R = \rho_0 c$ mnogo veći u vodi nego u zraku, uz istu akustičku snagu zvučni tlak mnogo je veći u vodi nego u zraku. Prema tome, membrana koja se izvodi od debele okrugle krute ploče može biti kruto vezana za kućište pretvarača. Time je postignuto da membrana i na ultrazvučnim frekvencijama radi kao sterna membrana. Otpor isijavanja membrane (uz $k r \gg 1$) je $R_s = \rho_0 c S = \rho_0 c r^2 \pi$, a akustička snaga $P_a = \rho c a^2 \pi v^2$, gdje je r poljumer membrane, $k = 2 \pi \lambda$ a v u titrajna brzina membrane. S druge strane membrane naizmjenično se zatvoreni zračni volumeni (koji služi kao reflektor) tako da su obje strane membrane jedna od druge akustički odijeljene. Ultrazvučni podvodni elektroakustički pretvarači rade sada najčešće na magnetostriktijskom, piezoelektričnom i elektrostriktijskom principu. Kao materijal za magnetostriktijske pretvarače služe cijevi ili paketi lameliranog žarenog nikla ili nekih legura (Co, Fe). Piezoelektrični pretvarači izrađuju se od pločica kristala kvarca, amonijum-dihidrogen-fosfata (ADP), turmalina i litijum-sulfata, a za elektrostriktijske pretvarače uzimaju se keramičke ploče od pečenog barijum-titanata ili cirkonata olova.

Impedancija magnetostriktijskog oscilatora je niska (nekoliko om), impedancija elektrostriktijskog oscilatora iznosi nekoliko stotina om, a za piezoelektrične oscilatore impedancija je velika ($\sim 10 \text{ k}\Omega$), što zahtijeva visoke pogonske napone.

Korisnost pretvarača svih tipova visoka je i kreće se oko 50%.

Usmjerenost isijavanja postiže se već relativno malim emiterima jer se valna duljina zvuka u vodi kreće u veličinskom redu centimetara.

Podvodni elektroakustički uređaji mogu se podijeliti na šumosmjerače, telekomunikacijske uređaje, podvodne lokatore i dubinomjere.

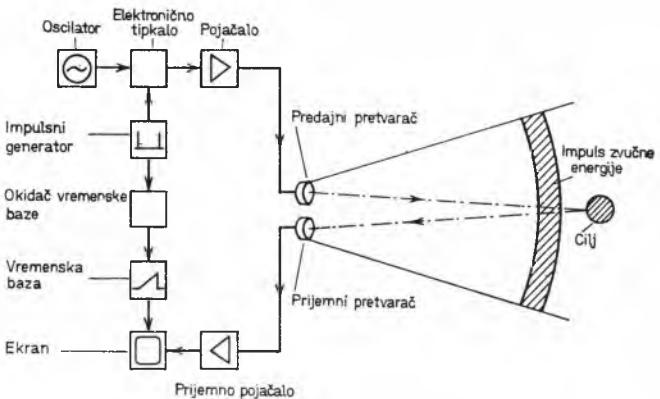
Šumosmjerači služe za otkrivanje podvodnih izvora zvuka (svjetionikâ, brodova i njihovih propelerâ, eksplozijâ i sl.). Šumosmj-

rači primaju zvuk s pomoću jednog, dva ili više (nekoliko desetaka) hidrofona, a smjer određuju na principu zaslanjanja, fazne razlike ili usmjerenoosti svoje usmjerne karakteristike.

Podvodni telekomunikacijski uređaji služe za održavanje telegrafске ili telefonske podvodne veze između ratnih brodova. Oni se sastoje od prijemnika i odašiljača od kojih svaki (ili oba zajedno) ima svoj elektroakustički pretvarač smješten ispod dna broda. Danas se takvi uređaji manje primjenjuju.

Podvodni lokatori služe za otkrivanje podvodnih ciljeva i određivanje njihove udaljenosti i smjera. Udaljenost se određuje na principu mjerjenja proteklog vremena između odašiljanja zvučnog impulsa i njegova povratka nakon refleksije od cilja. Smjer se utvrđuje na osnovi usmjerenoosti usmjerne prijemne karakteristike prijemnog pretvarača. Oni služe za otkrivanje podmornica, mina, torpeda, podvodnih prepreka, jata riba i sl. Princip podvodnog elektroakustičkog lokatora (PEL, engl. Asdic, Sonar) u vidu bloksheme prikazan je na sl. 116. Impulsi koje formira impulsni generator s pomoću elektroničkog tipkala pojačavaju se i isijavaju predajnim pretvaračem. Primljeni impulsi se pojačavaju i dovode na ekran kojemu je vremenska baza krenula već pri odašiljanju impulsa. (V. također članak *Brod*, TE 2, str. 318 i 328.)

Na sličnom principu rade i ultrazvučni dubinomjeri koji rade s manjom snagom, a svoju energiju isijavaju prema dnu mora.



Sl. 116. Blok-shema električnog podvodnog lokatora (PEL, Sonar)

INFRAZVUK

Infrazvučno područje obuhvaća frekvencije ispod donje granice čujnog područja, tj. ispod 20 Hz. Infrazvuk je prisutan stalno i svagdje. Njegovi prirodni uzroci jesu npr. olujni vjetar, erupcija vulkana, potres itd. Infrazvukove velikog intenziteta proizvode dizelski motori, neispravni industrijski ventilatori, sporohodni strojevi itd. Korisna primjena infrazvuka je npr. upotreba u podvodnoj telefoniji (SOFAR). Infrazvuk velikog intenziteta je štetan, jer uzrokuje živčanu zamorenost i, više od ultrazvuka i druge buke, dovodi do živčanih oboljenja u industrijskim gradovima. Protiv njega ne postoje nikakva sredstva zaštite (apsorberi, zapreke), jer je akustička izolacija proporcionalna frekvenciji. Jedini je način zaštite sprečavanje stvaranja infrazvuka u izvoru.

MJERENJE U ELEKTROAKUSTICI

U elektroakustici izvode se različita mjerena radi izučavanja prirodnih zvučnih slika, radi ispitivanja naprava za stvaranje, primanje i reprodukciju zvuka, te za izučavanje akustičkih svojstava medija kojima se širi zvuk. Ovdje će biti opisana, i to samo u načelu, samo neka od najvažnijih elektroakustičkih mjerena.

Mjerjenje veličina zvučnog polja. U zvučnom polju mjerse njegove osnovne veličine (titrajna brzina čestice, zvučni tlak i otpor), iz kojih se mogu odrediti druge veličine polja, npr. jakost zvuka. Najznačajnija i najčešće mjerena veličina polja, na koju reagira i čovječe uho, jest zvučni tlak.

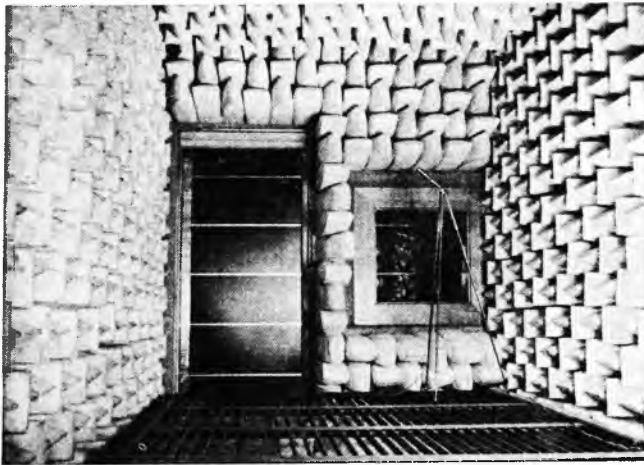
Brzina čestice može se mjeriti npr. mehaničkim putem s pomoću Rayleighove pločice (v. *Akustika*, TE 1, str. 65) i drugim mjernim napravama (npr. na termičkom principu).

Zvučni tlak određuje se redovito mikrofonom kojemu se izlazna elektromotorna sila mjeri cijevnim voltmetrom. Uredaj se mora prethodno baždariti mehaničkim, termičkim ili elektrostatičkim generatorom zvuka točno poznatog tlaka ili uspoređenjem s pokazivanjem Rayleighove pločice.

Za mnoga akustička mjerena (kao što su: ispitivanje govora, muzičkih instrumenata i drugih izvora zvuka, te različitih prijemnika zvuka) smiju se upotrijebiti samo nedeformirani progresivni valovi što ih izravno zrači izvor zvuka, za druga mjerena (npr. za mjerjenje faktora izobličenja) prikladni su stojni valovi, a za treća opet mjerena (npr. mjerjenje akustičke snage izvora i koeficijenta apsorpcije) primjenjuje se i difuzno zvučno polje.

Progresivni valovi mogu se ostvariti ako se izvor zvuka postavi na otvorenom slobodnom prostoru toliko visoko iznad zemlje da se izbjegne nepovoljno djelovanje njezine površine i objekata na njoj, a u laboratorijskim uvjetima u tzv. gluhoj komori. Stojni valovi mogu se proizvesti u cijevi s pomičnim stupom, a difuzno se akustičko polje uspostavlja u prostorijama s dugim vremenom odjeka, a najbolje u posebnim tzv. ječnim komorama.

Gluha komora je prostorija u kojoj zbog jake apsorpcije zvuka nema refleksija, pa stoga ni stojnih valova. U njoj se može ostvariti slobodno zvučno polje nedeformiranih progresivnih valova. Apsorpcija zvuka postiže se oblaganjem zidova, poda i stropa komore materijalima koji jako upijaju zvuk. Da bi se dovoljno apsorbirao i zvuk niskih frekvencija, slojevi obloge moraju biti dovoljno debeli (> 40 cm). Pogodnim oblikovanjem površine obloge zidova, poda i stropa, npr. u obliku mnoštva klinova ili piramide, postiže se da se zvuk medju njima, nakon nekoliko refleksija s njihovih površina, potpuno izgubi. U tako opremljenoj prostoriji može se postići koeficijent apsorpcije i veći od 0,99.



Sl. 117 Gluha komora (Elektrotehnički fakultet, Zagreb)

Zvučni tlak reflektiranog vala mora u ispravnoj zvučnoj komori biti bar 20 dB manji od zvučnog tlaka vala što ga emitira izvor. Najteže je to postići u području niskih frekvencija zvuka, jer su onda dimenzije izbočina na oblozi zidova, poda i stropa (npr. klinova) daleko manje od valne duljine zvuka. Stoga za svaku zvučnu komoru postoji donja granica frekvencije do koje ona još pravilno radi. Da bi se gluha komora zaštitila od vanjske buke, ona se gradi na elastičnim temeljima odvojenim od temelja ostalih dijelova zgrade.

Ječna (reverberaciona) komora je prostorija u kojoj se zvuk više puta za redom reflektira u različitim smjerovima, čime se stvara homogeno difuzno zvučno polje u kojemu je gustoća akustičke energije svadje jednaka. U takvim je prostorijama trajanje odjeka dugo. Uzastopna refleksija u različitim smjerovima postiže se nepravilnim (npr. trapezoidnim) rasporedom zidova i stropa, te specijalnim, npr. konveksnim, oblikom pojedinih ploha. Strop, pod i zidovi oblažu se istim materijalom, koji mora imati što manji koeficijent apsorpcije (npr. betonom, keramičkim pločicama ili stakлом). Ječne komore, slično kao i gluhe komore, moraju se zaštititi od vanjske buke. Za ispitivanje akustičkih svoj-

stava građevinskog materijala upotrebljavaju se dvije ječne komore spojene otvorom koji se zagradije ispitivanim materijalom.

Mjerjenje razine glasnoće zvuka vrši se objektivnim i subjektivnim metodama. *Objektivna mjerena razine glasnoće* svode se, u stvari, na mjerjenje zvučnog tlaka. Pri najjednostavnijoj objektivnoj metodi se direktno i određuje zvučni tlak, pa se iz njega pomoću dijagrama izofonâ (v. sl. 22) određuje pripadna glasnoća. Tome služe *zvukomjeri* (fonometri). Zbog ovisnosti praga čujnosti o frekvenciji, u konstrukciji takvih instrumenata uzeta je u obzir frekvencijska karakteristika. Kako izofone imaju različite oblike za različne glasnoće, postoje obično tri frekvencijske karakteristike (A, B, C) na koje se instrument može preklopiti prema razini mjerene glasnoće. (Za impulsnu buku ima još karakteristika D.) Za utvrđivanje glasnoće složenog tona zvukomjer ima ugradene i filtre pomoću kojih se može mjeriti odvojeno glasnoća komponentnih tonova po oktavama ili tercama. Pri *subjektivnoj metodi* mjerilac sam ocjenjuje glasnoću ispitivanog zvuka uspoređujući je s poznatom glasnoćom standardnog zvuka.

Analiza zvuka provodi se radi odvojenog mjerjenja pojedinih komponenata složenih tonova i buke. U instrumentima za analizu zvuka, *zvučnim analizatorima*, izlazna se elektromotorna sila mikrofona nakon pogodnog pojačanja filtrira u nizu oktavnih ili tercnih filtera, koji pokrivaju cijelo čujno zvučno područje, i privodi osciloskopu ili zapisnom (jedno- ili višekanalnom) instrumentu. Prema odabranoj aparaturi prikazivanje može biti istovremeno za sve kanale, uzastopno za pojedine kanale ili kontinuirano.

Analiza zvuka ima važnu ulogu pri ispitivanju zvučnih slika, govora i buke radi njezinog suzbijanja. U suzbijanju buke analiza zvuka služi za iznalaženje izvorâ koji proizvode najjaču buku (pojedini strojevi ili pojedini dijelovi strojeva, aviona, vozila itd.) radi utvrđivanja konstrukcijskih i drugih mjeru za sprečavanje njihove bučnosti ili za njihovu zvučnu izolaciju.

Mjerjenje nelinearnih izobličenja služi za utvrđivanje kvaliteta reprodukcije zvuka pomoću elektroakustičkih četveropola (mikrofona, zvučnika, kombinacije oscilator-pojačalo-zvučnik ili mikrofon-pojačalo-zvučnik). Takva se mjerena izvode na način i pomoći instrumenata opisanih u članku *Električna mjerena*, TE 3, str. 634. Radi izvođenja tih mjerena mikrofon i zvučnik postavljaju se obično u polje stojnih valova koji se stvaraju u posebnoj napravi, cijevi s pomičnim stupom.

Ispitivanje elektroakustičkih pretvarača (mikrofonâ, zvučnikâ, slušalicâ) predstavlja značajno područje elektroakustičkih mjerena. Takvim se mjerjenjima utvrđuje za mikrofone frekvencijska karakteristika osjetljivosti, karakteristika usmjerenoosti, karakteristika nelinearnih izobličenja, karakteristika faznih izobličenja, reagiranje mikrofona na prelazne pojave i frekvencijska karakteristika električne impedancije, a za zvučnike frekvencijska karakteristika, karakteristika usmjerenoosti, frekvencijska karakteristika korisnosti, karakteristika faznih izobličenja, frekvencijska karakteristika električne impedancije i reprodukcija prelaznih pojava. Za sva ova mjerena, koja se većinom izvode u gluhoj komori, a samo djelomično u ječnoj komori i napravi za stojne valove, razvijeni su prikladni aparati i mjerne metode koje se uglavnom zasnivaju na ranije opisanim principima.

Za ispitivanje *slušalica* postoji posebna naprava, tzv. *umjetno uho*, tj. kondenzatorski mikrofon s posebno oblikovanom pretkomorom, a za serijsko ispitivanje mikrofonâ poseban baždaren izvor, tzv. *umjetna usta*.

Fiziološka mjerena, npr. mjerjenje praga čujnosti, vrše se *audiometrom*. Taj se u principu sastoji od generatora sinusoidnog napona, kalibriranog potenciometra i slušalica. Uredaj se baždari umjetnim uhom i ispitivanjem osoba normalnog slухa.

Mjerjenje vremena odjeka izvodilo se nekad štopericom. Mjerilac je slušanjem utvrdio trenutak kad je prestao raditi izvor i trenutak kad se zvuk u prostoriji više nije čuo. Danas postoje za tu svrhu posebni instrumenti koji se sastoje od mikrofona, pojačala i zapisnog uređaja kojemu se zapisna igla skreće razmjerno logaritmu ulaznog napona. Kao izvor zvuka može služiti zvučnik kojim se prenosi neki akord ili modulirani zvuk, a ponekad se primjenjuje i pucanj iz pištolja.

Vrijeme odjeka važan je podatak pri akustičkom ispitivanju prostorija i utvrđivanju njihove pogodnosti za ozvučenje i druge namjene. On je potreban i pri određivanju akustičke snage potrebne za ozvučenje neke prostorije, nadalje pri mjerenu koeficijenta apsorpције, određivanju gustoće zvučne energije u nekoj prostoriji, itd.

Mjerenje koeficijenta apsorpције pojedinih (gradevinskih) materijala svodi se također na mjerenje vremena odjeka. Najprije se izmjeri vrijeme odjeka prazne ječne komore, a zatim vrijeme odjeka ječne komore u kojoj je ispitivani materijal rasporeden po svim ploham. Iz tih dvaju mjerena može se izračunati koeficijent apsorpцијe zvuka za ispitivani materijal.

Mjerenje akustičke izolacione moći svodi se na mjerenje zvučnog tlaka. U otvor zida, poda ili stropa (veći nego 3 m^2), kojim su spojene dvije inače jedna od druge dobro akustički izolirane ječne komore, ugraduje se (gradevinski) materijal kojem treba odrediti izolacionu moć. U jednoj od komora smješten je izvor zvuka ili buke (zvučnik ili mehaničko lupalo) pomoću kojeg se stvara difuzno zvučno polje. Baždarenim mikrofonom i pripadnim mernim uredajem mjeri se na više mesta svake od prostorija zvučni tlak radi utvrđivanja njegove prosječne vrijednosti; iz obiju tako određenih prosječnih vrijednosti izračunava se izolacija i izolaciona moć ispitivanog materijala.

LIT.: W. T. Bartholomew, *Acoustics of music*, New York 1952. — F. Schuh, N. Mikhnevitch, *L'enregistrement magnétique*, Paris 1952. — J. W. Winstanley, *Textbook on sound*, New York 1952. — F. S. Saic, *Elektroakustik*, Wien 1952. — F. Krones, *Die magnetische Schallauflaufzeichnung*, Wien 1952. — G. W. Swenson, *Principles of modern acoustics*, New York 1953. — E. Skudryj, *Die Grundlagen der Akustik*, Wien 1954. — E. Wever, M. Laurence, *Physiological acoustics*, New York 1954. — B. A. Красильников, *Звуковые волны в воздухе, воде и твердых телах*, Москва 1954. — L. Coutarie, *Acoustique appliquée*, Paris 1955. — A. B. Wood, *A textbook of sound*, London 1955. — S. Begun, *Magnetic recording*, New York 1955. — R. Feldkeller, E. Zwicker, *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*, Stuttgart 1956. — W. Furrer, *Akustik*, Basel 1956. — H. Lowery, *A guide to musical acoustics*, London 1956. — H. F. Olson, *Acoustical engineering*, New York 1957. — E. G. Richardson, *Sound*, London 1957. — H. Burstein, C. Pollak, *Tape recorder circuits*, New York 1957. — O. Brand, *Akustisk planering*, Stockholm 1958. — J. Moir, *High quality sound reproduction*, London 1958. — W. E. Steward, *Magnetic recording technique*, New York 1958. — J. R. Pierce, E. E. David, *Man's world of sound*, New York 1958. — H. M. Tremaine, *The audio cyclopaedia*, New York 1959. — M. Adam, *Akustik*, Bern 1959. — C. H. Ponelius, *Kurs lekций по теории звука*, Москва 1960. — H. Kurtović, *Elektroakustika*, 2 sv., Beograd 1960. — M. Dourian, *Steréophonie, disques, haute fidélité*, Paris 1960. — G. Slot, *From microphone to ear*, Eindhoven 1960. — F. Trendelenburg, *Einführung in die Akustik*, Berlin 1961. — T. Jelaković, *Arhitektonska akustika*, Zagreb 1962. — M. Rettinger, *Practical electroacoustics*, London *1962. — H. Mercier, *Traité d'acoustique*, Paris 1962. — L. L. Beranek, *Music, acoustics, architecture*, New York 1962. — L. E. Kinsler, A. R. Frey, *Fundamentals of acoustics*, New York *1962. — D. A. Snel, *Magnetische Tonaufzeichnung*, Eindhoven *1963. — A. E. Robertson, *Microphones*, New York 1963. — N. W. Franssen, *Stereofonie*, Eindhoven 1963. — J. Matras, *Acoustique et electroacoustique*, Paris 1964. — M. Adlešić, *Svet zvoka in glasbe*, Ljubljana 1964. — H. Burrel Hadden, *Practical stereophony*, London 1964. — L. Guéyse, P. Sabathé, *Acoustique sous-marine*, Paris *1964. — G. Slot, *Die Wiedergabequalität elektroakustischer Anlagen*, Eindhoven 1965. — W. Moll, *Bauakustik I*, Berlin 1965. — Z. Zyszkowski, *Podstawy elektroakustiki*, Warszawa 1966. — H. H. Klinger, *Technische Akustik*, München 1966. — G. Bösl, *Hi-Fi und Stereo für den Tonbandfreund*, Stuttgart 1966. — D. G. Tucker, B. K. Gazey, *Applied underwater acoustics*, London 1966. — I. Dragović, *Mikrofoni*, Beograd 1966. — A. P. Smirnov, *Акустика моря*, Leningrad 1966. — A. Šerter, *Otorinolaringologija*, I. Procedurika, Zagreb 1966. — M. Kuljić, *Osnovi hidroakustike i hidroakustičkih uređaja*, Beograd 1967. — L. Cremer, M. Heckl, *Körperschall*, Berlin 1967. — E. Meyer, E. G. Neumann, *Physikalischs und technische Akustik*, Braunschweig 1967. — J. Jecklin, *Lautsprecherbuch*, Stuttgart 1967. — F. Bergfeld, *Moderne Schallplattentechnik*, München *1967. — G. Bösl, *Philips Lehrbriefe*, Bd II, Hamburg 1967. — T. Jelaković, *Magnetsko snimanje zvuka*, Zagreb 1968. — W. Reichhardt, *Grundlagen der technischen Akustik*, Leipzig 1968. — F. Kühne, *Musikübertragung*, Sanlagen, München 1968. — M. Schmidt, *Schalltechnisches Taschenbuch*, Düsseldorf 1968. — S. Miszcza, *Elektroakustika*, Warszawa s. a. (~ 1968). — E. Christian, *Magnettontechnik*, München 1969. — T. Jelaković, *Mikrofoni*, Zagreb 1969. — L. F. Yerges, *Sound, noise, vibration control*, New York 1969. — M. L. Gayford, *Electroacoustics*, London 1970. — J. V. Tobias, *Foundations of modern auditory theory*, vol. I, New York-London 1970. — W. Reichhardt, *Elektroakustik*, Leipzig 1971. — C. M. Alou, H. H. Maximov, *Музикальная акустика*, Москва 1971. — F. Kühne, K. Tetzner, *Kleines Stereo-Praktikum*, München 1971. — B. Somek

ELEKTRODIJALIZA, tehnička operacija pri kojoj se proces analogan dijalizi (v. TE 3, str. 338) vrši pod utjecajem električnog potencijala kao glavne djelujuće sile procesa. Osnovni proces obične dijalize, difuzija kroz polupropusnu membranu izazvana razlikom kemijskog potencijala otopljene tvari u difuzatu i dijalizatu, postaje sporedan, a kao glavni nastupa prinudno kretanje iona pod utjecajem električnog polja (okomitog na površinu membrane). Iz definicije slijedi da se elektrodijaliza može primjeniti samo na otopine koje sadrže elektrolite. Za njezinu provedbu potrebne su membrane i njihovi nosači, komore i putovi otopina kao u običnoj dijalizi, ali se elektrodijaliza razlikuje od obične dijalize konstrukcijom aparature, namjenom i potrebnim

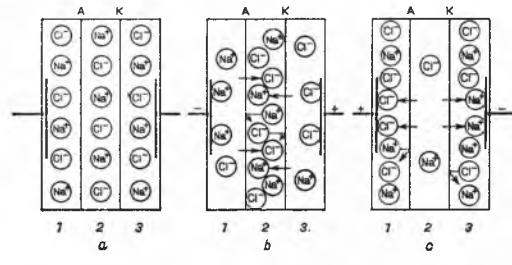
svojstvima membrana. Obična dijaliza, kao »pasivni« proces koji ovisi o postojanju konačne razlike koncentracije medju otopinama s obiju strana membrane, može da se odvija samo u jednom smjeru, i to određenom brzinom na koju se gotovo nikako ne može utjecati i koja postaje praktički jednaka nuli prije nego što je sva otopljena tvar prodifundirala kroz membranu. Pri elektrodijalizi može se smjer difuzije kroz membranu obrnuti, a okolnost da se njome mogu ukloniti i posljednji tragovi elektrolita iz dijalizata, npr. iz otopine koloida, i da se mogu postići veći učinci, glavne su prednosti elektrodijalize pred običnom dijalizom.

Elektrodijalizu je vjerojatno prvi upotrijebio Schwein (1900), ali se pronađazak elektrodijalizacije obično pripisuje H. N. Morseu i I. A. Piercu, koji su je 1930 upotrijebili za čišćenje otopine želatine od elektrolita u običnom laboratorijskom dijalizatoru, kakav se tada upotrebljavao. W. Pauli sa saradnicima prvi je racionalno konstruirao laboratorijski elektrodijalizator sa tri komore odvojene jedna od druge neselektivnim membranama. E. Mangold i K. Kalauč pokazali su 1939 da su za postizanje većih učinaka potrebne ionski vrlo visoke permselektivne membrane; 1940 predložili su K. H. Meyer i W. Strauss konstrukciju elektrodijalizatora sa takvima membranama u izvedbi s većim brojem komora. Danas se u tehničkoj praksi isključivo upotrebljavaju takvi elektrodijalizatori.

Visoko ionski permselektivne membrane počele su se proizvoditi tek poslijepodne drugog svjetskog rata, kada je industrija po prihvatljivim cijenama stavila na raspolaganje sintetske tvari od kojih su se takve membrane mogle proizvesti i kad je elektrodijaliza dobila jak poticaj kao jedan od perspektivnih postupaka za rješavanje sve aktuelnijeg problema snabdijevanja svijeta dovoljnim količinama slatke vode.

Ionski permselektivne membrane, koje se još nazivaju i ionski selektivnim, ionski permeabilnim membranama i membranama za izmjenu iona, polupropusne su opne koje, kada odjeliuju dvije otopine elektrolita izložene djelovanju električnog polja okomitog na njihovu površinu, pokazuju svojstvo selektivnog transporta iona određenog naboja. To svojstvo posljedica je njihove polielektrolitske grade s ionima jednog naboja učvršćenim u netopljivu matricu i pokretljivim protuionima koji mogu prenositi elektricitet. (V. Membrane.)

Djelovanje ionski permselektivne membrane pri elektrodijalizi otopine kuhinjske soli prikazano je shematski na sl. 1. U najjednostavnijem elektrodijalizatoru tri su komore odvojene jedna od druge idealno permselektivnim membranama A i K, od kojih membrana A potpuno propušta katione i potpuno prijeći put kationa, membrana K propušta katione i potpuno prijeći put aniona, a obje isključuju sve ostale oblike difuzije, npr. običnu dijalizu, osmozu i elektroosmozu (sl. 1 a). Očito je da se, kada je katoda u komori 1 a anoda u komori 3 (sl. 1 b), u komori 2 moraju nagomilavati ekvivalentne količine kationa i aniona, jer im se na njihovim putevima iz te komore u katodnu komoru 1, odn. anodnu komoru 3, isprečuju za njih nepropusne permselektivne membrane. Istovremeno iz komore 3 nestaju količine kationa, a iz komore 1 količine aniona ekvivalentne količinama kationa odn. aniona nagomilanih u komori 2. Ovi procesi očituju se posljedicama poznatih elektrodnih reakcija (tj. razvijanjem vodika i nastajanjem natrijum-hidroksida na katodi i klora, klorovodične kiseline i kisika na anodi) i odgovarajućim elektrodijalitičkim učinkom, tj. povećanjem koncentracije NaCl u komori 2 i njenim smanjenjem u komorama 1 i 3.



Sl. 1. Elektrodijalizator s tri komore. a Stanje kad struja ne teče kroz aparat, b stanje kad struja teče u jednom smjeru (otopina se koncentriira u komori 2), c stanje kad struja teče u suprotnom smjeru (otopina u komori 2 se razrjeđuje). A anionski permselektivna membrana, K kationski permselektivna membrana, 1-3 komore

Kada se, pak, obrne smjer električne struje, tj. kad se elektroda u komori 1 učini anodom a elektroda u komori 3 katodom (sl. 1 c), sloboden je put do elektroda objema vrstama iona koji se nalaze u komori 2, ali kationi ne mogu izići iz komore 1, a anioni iz komore 3. Zbog toga u elektrodnim reakcijama, koje su jednake kao i u prethodnom slučaju i imaju jednake vanjske posljedice,