

su uređaji za brzu promjenu odnosa gledališta i scene s rasklopivim i pomičnim sustavom tribina za gledaoce i elemenata za tvorbu scenskih prostora.

Bez obzira na tip kazališta, u svim prostorijama mora postojati ozvučenje (obavijesti, vatrogasna preventiva), višestruki sustavi detekcije požara, sustav za gašenje požara, te rasvjeta u nuždi.

LIT.: M. Bauer-Heinhold, Theater des Barock, Callwey, München 1966. — H. Chr. Hoffmann, Die Theaterbauten von Fellner und Helmer, Prestel Verlag, München 1966. — M. Berthold, Weltgeschichte des Theaters; Kröner, Stuttgart 1968. — Ph. Hartnoll, A concise history of the theatre, The World of Art Library 1968. — F. E. Brown, Roman architecture, Studio vista, London 1968. — G. Graubner, Theaterbau Aufgabe und Planung, Callwey, München 1968. — H. Schubert, Moderner Theaterbau, Krämer Verlag, Stuttgart-Bern 1971. — C. Molinari, Theatre through the ages, McGraw-Hill, New York 1975. — G. C. Izenour, Theater design, McGraw-Hill, New York 1977.

V. Marsić

MUZIČKI INSTRUMENTI ili glazbala jesu uređaji koji proizvode organiziran, za uho ugodan zvuk, tj. promjenljivi zvučni tlak u zraku. Za dobivanje zvuka potreban je izvor energije. To može biti muzičar, npr. povlačenjem gudačkom po strunama, puhanjem u sviralu, udaranjem itd. Kako je energija koju proizvodi čovjek ograničena, a za pobudu pojedinih instrumenata i premalena, neki se instrumenti pobuđuju posebnim izvorima mehaničke ili električne energije. Tada je mehanički ili elektronički pobudni sustav pomoć glazbeniku pri sviranju. Tako se, npr. orgulje pobuđuju električnom energijom (električnim motorom).

Danas se upotrebljavaju elektronički muzički instrumenti kojima je način proizvodnje zvuka i upotrebe potpuno različit od tzv. klasičnih glazbala. Zvuk se dobiva pomoću elektroničkih generatora, različitih sklopova i uređaja za obrađivanje i elektroničko upravljanje signala, te pomoću pojačala i zvučnika, itd.

Glazbalo stvara u zvučnom polju zvučne pojave potrebne za estetski doživljaj i koje zadovoljavaju estetske zahtjeve, a osnovna su mu svojstva visina tona, jakost ili intenzitet zvuka, te boja tona u određenom vremenskom toku.

Razvrstavanje glazbala. Glazbala se mogu razvrstati: a) prema vrsti pobudnih sustava: štapovi i ploče koji neposredno proizvode zvuk, svirale u kojima titra zračni stupac, glazbala s napetim žicama (strunama) i membranama; b) prema geometrijskom obliku izvora: linearni (žice, štapovi), površinski (ploče, membrane) i prostorni (svirale — zračni stupci). Prema načinu gradnje generatora zvuka glazbala se mogu razvrstati u sljedeće skupine: *štapovi*: triangel (trokutač), ksilofon, celesta; *ploče*: gong, čineli (plitice), kastanjete, zvona; *membrane*: bubanj, timpani; *žice*: violina, viola, violončelo, kontrabas, viola da gamba (gambe), glasovir, pianino, citra, harfa, lutnja, mandolina, tambura, cimbali, klavikord, gitara, bendžo (engl. banjo), balalajka; *svirale s usnom*: flauta, svirala orgulja; *svirale s jezičcem*: oboa, engleski rog, fagot, kontrafagot, klarinet, saksofon, svirale orgulja s jezičcima, harmonij, harmonika itd.; *svirale s usnikom*: kornet, trublja, pozauna (trombon), tuba.

Prema zvučnim svojstvima glazbala se mogu razvrstati na ritmička, melodijsko-ritmička, melodijska, te na polifona i monofona.

Ritmička glazbala imaju nedefiniranu visinu tona i stvaraju veoma mnogo jakih neharmonijskih komponenata. Njihova zvučna svojstva jesu boja i glasnoća (triangel, kastanjete, čineli, bubanj).

Melodijsko-ritmička glazbala (ksilofon, timpani) imaju uglavnom neharmonijske komponente zbog udarca. Međutim, osim jakosti i boje za njih je važna i visina tona.

Zvuk melodijskih glazbala sadrži uglavnom harmonijske komponente. U monofonim glazbalima zvuči samo jedan ton, a na polifonima mogu se svirati akordi, odnosno više tonova istodobno.

Zato se glazbala razvrstavaju prema akustičnoj pripadnosti, koja je karakterizirana zvučnom slikom. Analiza zvuka pojede-

dinih glazbala pokazuje da zvučna slika ovisi o načinu na koji se pobuđuje pobudni sustav: štap, žica, ploča, zračni stupac, itd. Klasična glazbala čine tri velike skupine s podskupinama, a posebnu veliku skupinu glazbala čine električna i elektronička glazbala: a) *žičana glazbala*: gudačka, trzalačka i glazbala s batičem; b) *duhačka glazbala*: limena (s usnikom), drvena (s usnom ili s jezičcem) i mješana (s usnom ili s jezičcem); c) *udaraljke*: s definiranom visinom tona (štapovi, cijevi, ploče) i s nedefiniranom visinom tona (membrane); d) *elektronički muzički instrumenti*: električna i elektronička glazbala, procesori.

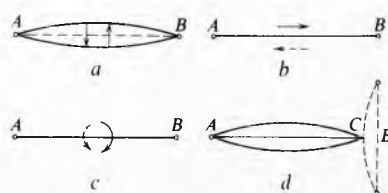
Rezonatori i emiteri. Prema drugoj definiciji većina su glazbala sustavi koji na principu akustičke rezonancije stvaraju tonove određene visine. Mnogo je titrajnih sustava koji posjeduju rezonantna svojstva pogodna za upotrebu u glazbalima. To su strune, štapovi, ploče, membrane, cijevi, trube i električni generatori. U nekim sustavima rezonantne su frekvencije stalne, a u drugima se mijenjaju. Rezonantni i emiserski sustavi pogodni su za stvaranje zvučnih valova.

KLASIČNA GLAZBALA

Gotovo sva klasična glazbala sastoje se od tri osnovna sustava: generatora koji proizvodi mehaničke titraje, sustava koji pomoću rezonatora ili emitera mehaničko titranje pretvara u zvučno i veznog sustava koji čini da se titranja u navedenim sustavima međusobno potpomažu ili upotpunjuju (v. *Akustika*, TE1, str. 56; v. *Elektroakustika*, TE4, str. 298).

Izvori zvuka

Titranje žica. Napeta žica je rezonantni sustav koji se upotrebljava u mnogim glazbalima i jedan je od najstarijih izvora zvuka. Sila koja napinje žicu obično je tisuću puta veća od težine žice. Žice ili strune prave se od prirodnih i umjetnih vlakana (npr. crijeva, sintetska vlakna), ili od metala. Žica može titrati na četiri osnovna načina (sl. 1).



Sl. 1. Četiri načina titranja žice: a) transversalno, b) longitudinalno, c) torzijsko, d) složeno

Transverzalno titranje je titranje pri kojemu čestice titraju okomito na žicu (sl. 1 a.). Osnovna je frekvencija transversalnog titranja

$$f_{T1} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{m}}, \quad (1)$$

gdje je l duljina žice, T sila napinjanja žice, a m duljinska masa žice. Ostale frekvencije titranja više su harmonijske frekvencije (tzv. harmonici ili nadvalovi) osnovne frekvencije.

Longitudinalno titranje žice je titranje pri kojem čestice titraju u smjeru žice (sl. 1 b.). Osnovna je frekvencija longitudinalnog titranja

$$f_{L1} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2)$$

gdje je E Youngov modul elastičnosti, a ρ gustoća žice.

Torzijsko titranje nastaje, npr., kad je žica ovješena (sl. 1 c.). Tada je osnovna frekvencija

$$f_{T1} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (3)$$

gdje je G modul torzije.

Složeno titranje žice nastaje kada se žica oslanja na membranu koja titra (bendžo, sl. 1 d.).

Realna žica može titrati na sva četiri načina, što svakako utječe na boju zvuka. Broj harmonijskih frekvencija i ostalih komponenta u tonu ovisi o načinu pobuđivanja žice na titranje (povlačenjem gudalom, trzanjem, udarom). Ipak se može reći da u mnogim vrstama glazbala prevladava transversalno titranje.

Žičana glazbala jesu: violina, viola, violončelo, kontrabas, gitara, tambura, mandolina, glasovir itd.

Titranje štapova. Kad se analizira titranje žice promatra se savršeno elastična žica kojoj je povratna sila zbog krutosti zanemarljiva prema onoj od napetosti. Nenapeti štap drugi je krajnji slučaj. Povratna sila nastaje tada samo zbog krutosti. Štapovi mogu titrati longitudinalno i transversalno, a frekvencije titranja veoma ovise o načinu učvršćenja.

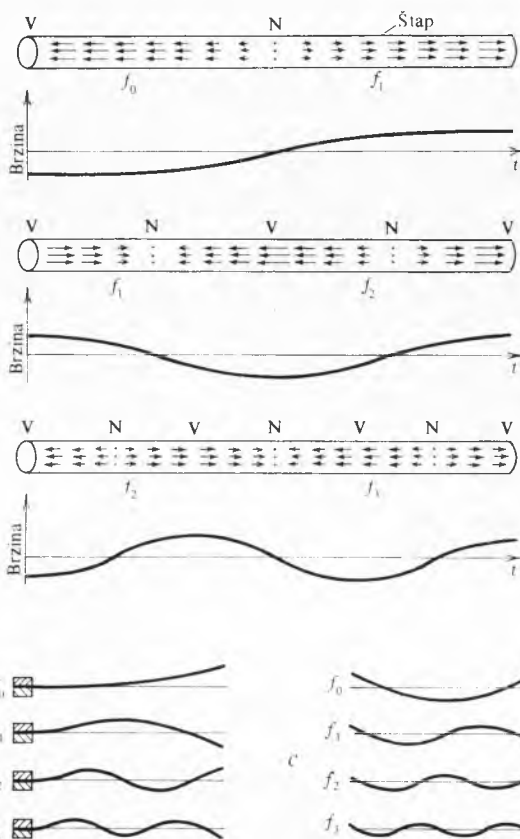
Longitudinalno titranje. Osnovna je frekvencija longitudinalnog titranja slobodnog štapa

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (4a)$$

a više su harmonijske frekvencije

$$f_n = n f_0, \quad (4b)$$

gdje je $n = 1, 2, 3 \dots$. Nadvalovi su više harmonijske frekvencije osnovne frekvencije (sl. 2a). Čvorovi osnovnog vala nastaju na polovici štapa, a trbusi na krajevima.



Sl. 2. Titranje štapova. a longitudinalno titranje slobodnog štapa (strelice označuju relativnu deformaciju), b transversalno titranje štapa upetog na jednom kraju, c transversalno titranje slobodnog štapa. N čvorovi, V trbusi, f_0 osnovna rezonantna frekvencija, $f_1, f_2, i f_3$ prva, druga i treća harmonijska frekvencija

Osnovna rezonantna frekvencija nastaje kada je duljina štapa jednaka polovici valne duljine

$$f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2l}, \quad (4c)$$

gdje je c brzina širenja zvuka i λ valna duljina. Kao standard visine tona za frekvencije više od 5000 Hz, za koje frekvencije glazbena viljuška ne zadovoljava, upotrebljava se štap koji stvara longitudinalne valove a pobuđuje se udarenjem o krajeve.

Za štap upet na jednom kraju harmonijske frekvencije longitudinalnog titranja jesu

$$f_n = \frac{2n-1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = (2n-1) f_0, \quad (5)$$

gdje je $n = 1, 2, 3 \dots$

Transverzalno titranje. Osnovna je frekvencija štapa upetog na jednom kraju (sl. 2b)

$$f_0 = \frac{0,5596}{l^2} \sqrt{\frac{E i^2}{\rho}}, \quad (6)$$

gdje je i polumjer tromosti poprečnog presjeka. Za pravokutni presjek $i = a/\sqrt{12}$, gdje je a debljina štapa; za kružni presjek $i = r/2$, gdje je r polumjer štapa; za cijev $i = \frac{\sqrt{r^2 + r_1^2}}{2}$, gdje je r vanjski, a r_1 unutarnji polumjer cijevi.

Nadvalovi pri transversalnom titranju štapa nisu u harmonijskom odnosu prema osnovnoj frekvenciji. Za štap upet na jednom kraju frekvencije titranja odnose se kao 1:6,267:17,55:34,39 itd.

Oboa, klarinet, fagot, saksofon i glazbena viljuška primjeri su upotrebe štapa upetog na jednom kraju.

Za slobodan štap osnovna je frekvencija

$$f_0 = \frac{1,33 \pi}{l^2} \sqrt{\frac{E i^2}{\rho}}, \quad (7)$$

Način titranja slobodnog štapa prikazan je na sl. 2c, a frekvencije titranja odnose se kao 1:2,756:5,404:8,933 itd.

Ksilofon, marimba, zvončići (Glockenspiel, carillon) i zvana primjer su glazbala sa slobodnim štapom.

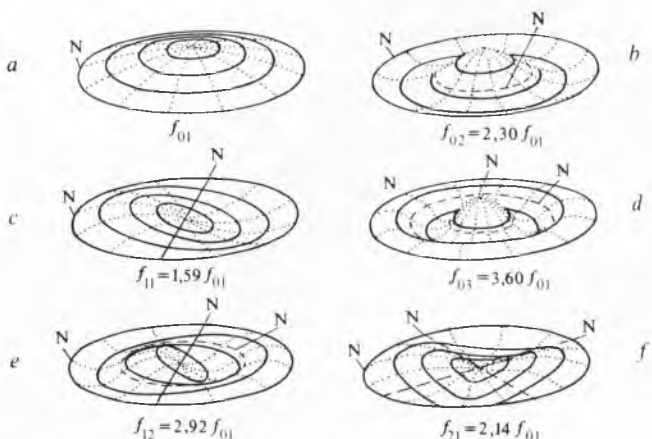
Titranje membrane. U mnogim glazbalima upotrebljava se okrugla membrana napeta na kruti okvir. Osnovna je frekvencija kružne membrane

$$f_{01} = \frac{0,382}{r} \sqrt{\frac{T}{m}}, \quad (8)$$

gdje je r polumjer membrane, T napetost, a m ploštinska masa. Osnovni val ima čvorove u kružnicama maksimalno udaljenim od središta (sl. 3a). Frekvencije nadvalova kružnih čvorova titranja odnose se kao 1:2,30:3,60... (sl. 3b i 3d). Frekvencija nadvalova titranja kad čvorovi stojnih valova nastaju u smjeru promjera iznosi $f_{11} = 1,59 f_{01}$, $f_{21} = 2,14 f_{01}$ itd. (sl. 3c i 3f). Frekvencije su složeni titranja $f_{12} = 2,92 f_{01}$ (sl. 3e).

Bendžo, tamburin i bubanj jesu glazbala s napetom membranom. Svakako da i tijelo glazbala utječe na način titranja.

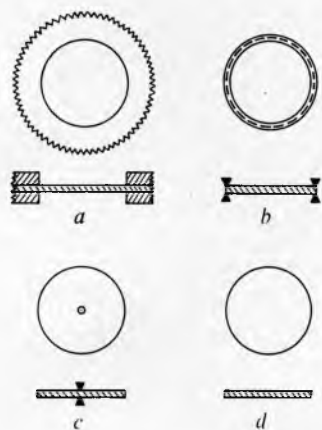
Titranje ploče. Ploče koje se upotrebljavaju u glazbalima mogu biti upete po rubu, poduprte po rubu, poduprte u sre-



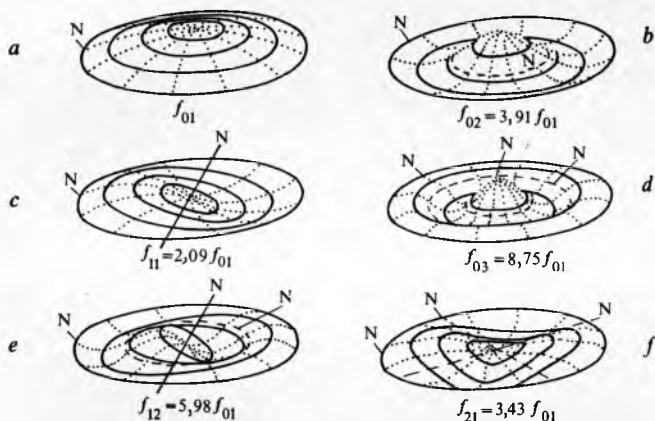
Sl. 3. Načini titranja napete okrugle membrane. a osnovni val, b i d nadvalovi s kružnim čvorovima, c i f nadvalovi s čvorovima u smjeru promjera, e složeno titranje, N čvor

dištu ili slobodne (sl. 4). Nadvalovi pravokutne ploče bliži su nekom kvaziharmoničkom odnosu nego okrugle ploče, te se odnose kao $\sqrt{2}:\sqrt{5}:\sqrt{10}:\sqrt{13}:\sqrt{17}$ itd.

Ploča upeta po rubu. Na osnovi teorije zvučnih figura (Chladnijeve figure) utvrđeno je da okrugla ploča upeta po vanjskom rubu može titrati na tri načina (sl. 5).



Sl. 4. Načini učvršćenja ploče. a upeti rub, b poduprti rub, c poduprto središte, d slobodna ploča



Sl. 5. Neki načini titranja ploče upete po rubu. a, b i d kružnice čvorova, c i e promjeri čvorova, f složeno titranje

Prvim načinom titranja nastaje osnovni ton, pa su tada čvorovi kružnice najudaljeniji od središta ploče (sl. 5a). Pri ostalim frekvencijama tog načina titranja čvorovi su koncentrične kružnice (sl. 5b, d). Osnovna je frekvencija

$$f_0 = \frac{0,467d}{r^2} \sqrt{\frac{E}{(1-\mu)}}, \quad (9)$$

gdje je d debljina ploče, r polumjer ploče a μ Poissonov koeficijent.

Drugim načinom titranja čvorovi nastaju u smjeru promjera, a frekvencije su tada f_{11} , f_{21} itd. (sl. 5c, e).

Treći način titranja (sl. 5f) kombinacija je prvih dvaju, a frekvencije su f_{12} .

Frekvencije nadvalova prema osnovnom tonu odnose se kao $f_{01} : f_{02} : f_{03} : f_{11} : f_{21} : f_{12} = 1 : 3,91 : 8,75 : 2,09 : 3,43 : 5,98$.

Slobodna ploča. Osnovna je frekvencija slobodne ploče pri titranju s čvornim kružnicama čvorova

$$f = \frac{0,412d}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\varrho(1-\mu^2)}}, \quad (10a)$$

a pri titranju s polumjerom čvorova

$$f = \frac{0,193d}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\varrho(1-\mu^2)}}, \quad (10b)$$

Gong je glazbalo sa slobodnom pločom.

Ploča poduprta u središtu. Osnovna je frekvencija

$$f = \frac{0,172d}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\varrho(1-\mu^2)}}. \quad (11)$$

Činili su glazbalo s pločom poduprtom u središtu.

Ploča poduprta po vanjskom rubu ima osnovnu frekvenciju titranja

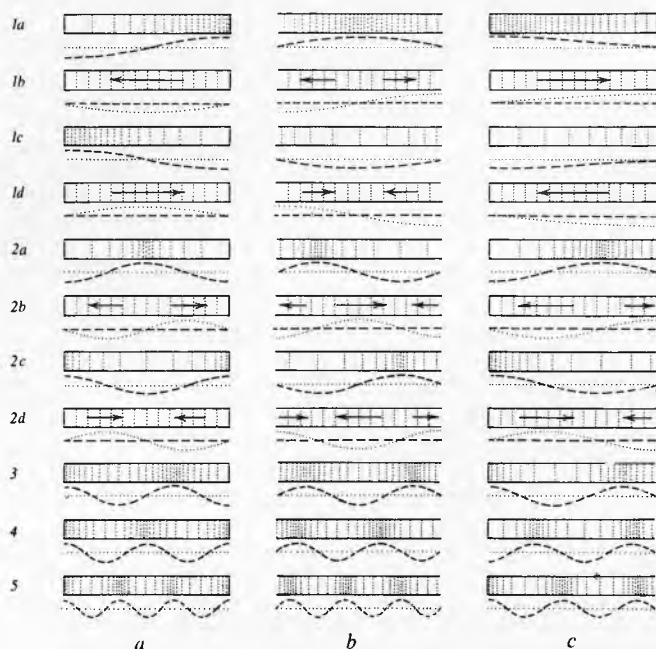
$$f = \frac{0,233d}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\varrho(1-\mu^2)}}. \quad (12)$$

U relacijama (6) do (12) nalaze se brojčani faktori koji su dobiveni teorijskim razmatranjima ili eksperimentima (E. F. F. Chladny, M. Faraday, Ch. Wheatstone, G. R. Kirchhoff, lord Rayleigh i dr.).

Akustika svirala

Titranje cijevi. Cijev kao rezonantni sustav upotrebljava se u mnogim glazbalima. Titranje stupca zraka u valjkastim cijevima analogno je longitudinalnom titranju štapova. Bez detaljnog poznavanja akustike duhačkih glazbala i svirala nemoguće je okarakterizirati njihov zvuk, ocijeniti njihovu važnost u instrumentaciji i ocijeniti doprinos konstruktora u gradnji različitih mehaničkih, elektromehaničkih i elektroničkih instrumenata. Način titranja stupca zraka u cijevi ovisi o izvedbi cijevi, koja može biti zatvorena, poluotvorena (zatvorena s jedne strane) i otvorena. Pri razmatranju zvučnih pojava u cijevi potrebno je uzeti u obzir da na mjestu gdje je svirala povezana s vanjskim zvučnim poljem zvučni tlak mora uvijek biti jednak vanjskome. Kad stojni valovi nastaju u zatvorenim, otvorenim i s jedne strane otvorenim cijevima, čvorovi se zvučnih tlakova i titrajne brzine ne poklapaju (sl. 6). Nadalje, kod otvorenih krajeva cijevi nastaje uvijek čvor zvučnog tlaka i trbuh titrajne brzine na otvorenom dijelu cijevi, dok kod zatvorenog kraja nastaje, obrnuto, trbuh zvučnog tlaka i čvor titrajne brzine.

Na sl. 6 prikazani su nastajanje stojnog vala zvučnog tlaka, te titrajne brzine osnovnog tona i viših harmonijskih frekvencija u zatvorenoj, otvorenoj i poluotvorenoj cijevi. Za akustičku analizu interesantne su s obje strane otvorena cijev i s jedne strane zatvorena cijev, koja će se dalje zvati zatvorena cijev, a bit će razmatrana pomoću elektroakustičkih analogija.



Sl. 6. Titranje zračnog stupca u cijevima. a stojni val u zatvorenoj, b u otvorenoj i c u cijevi zatvorenoj s jedne strane, i to za prvih pet tonova (----- zvučni tlak, brzina zvuka)

Zatvorena cijev. U cijevi zatvorenoj s jedne strane raspodjela zvučnog tlaka i titrajne brzine određene su sljedećim izrazima:

$$p_l = p_0 \cos(kl) \exp i\omega t, \quad (13)$$

$$v_l = \frac{p_0}{z_0} \sin(kl) \exp i\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (13a)$$

gdje je $z_0 = \rho c$ akustička impedancija, a $k = 2\pi/\lambda$.

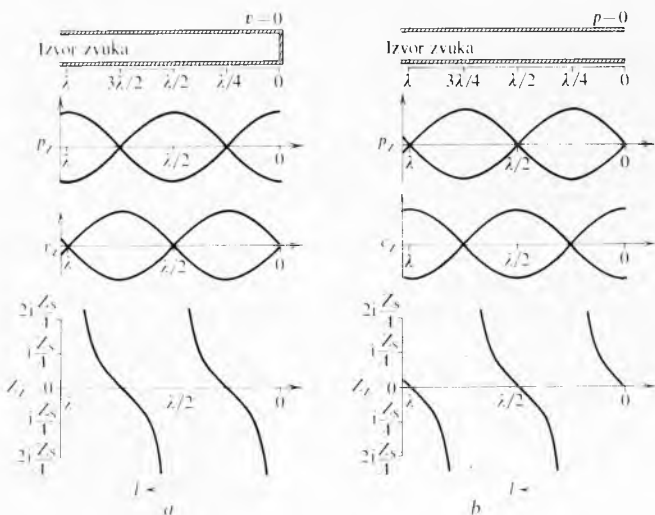
Tim se jednadžbama opisuju stojni valovi. Zvučni se tlak mijenja po zakonu kosinusa, a titrajna brzina po zakonu sinusa. Zvučni tlak i titrajna brzina pomaknuti su u fazi za 90° . Na sl. 7a prikazan je zvučni tlak i titrajna brzina kao funkcija koordinate l . Čvorovi titrajne brzine leže na udaljenostima $l = n\lambda/2$ (gdje je $n = 0, 1, 2, 3, \dots$) od zatvorenog kraja cijevi, a trbusi na mjestima $l = \frac{n\pi}{2} + \frac{\lambda}{4}$. Osnovna rezonantna frekvencija i frekvencije viših harmonijskih frekvencija mogu se izračunati prema izrazu:

$$f_n = (2n - 1) \frac{c}{4l}, \quad (14)$$

gdje je $n = 1, 2, 3, \dots$, a c brzina zvuka. Osnovna je rezonantna frekvencija takve cijevi

$$f_1 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4l}, \quad (15)$$

a viši tonovi neparne su više harmonijske frekvencije osnovnog tona.



Sl. 7. Ovisnost maksimalnih vrijednosti zvučnog tlaka p_z i brzine zvuka v_z te akustičke impedancije Z_z o udaljenosti od kraja cijevi: a u zatvorenoj i b u otvorenoj cijevi

Otvorena cijev. U cijevima otvorenim s obje strane pojavljuju se stojni valovi koji su određeni izrazima

$$p_l = z_0 v_0 \sin(kl) \exp i\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (16)$$

$$v_l = v_0 \cos(kl) \exp i\omega t, \quad (17)$$

a rezonantne frekvencije izrazom

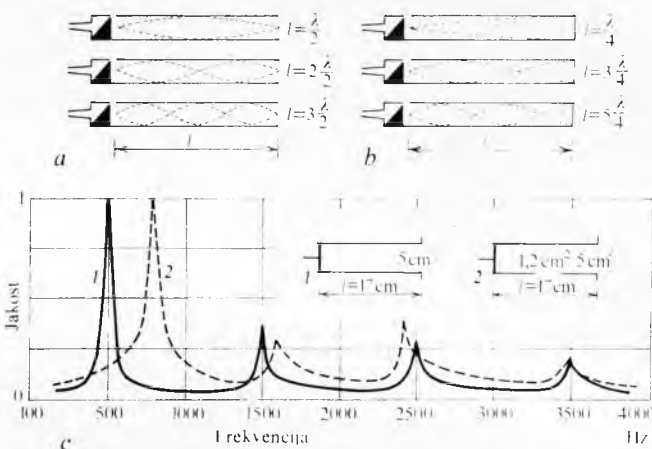
$$f_n = n \frac{c}{2l}, \quad (18)$$

gdje je $n = 1, 2, 3, \dots$, a c brzina širenja zvuka. Osnovna frekvencija može se izračunati prema relaciji

$$f_1 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2l}, \quad (19)$$

Tok zvučnog tlaka i titrajne brzine funkcija su duljine l (sl. 7b).

U otvorenoj svirali nastaju sve moguće više harmonijske frekvencije koje se mogu izračunati prema relaciji (18), a u zatvorenoj cijevi nastaju samo neparne više harmonijske frekvencije koje se mogu izračunati prema relaciji (14). Budući da se tonovi u sviralama pobuđuju na posebne načine, potrebno je razmotriti nastajanje titraja u stvarnim sviralama. Na sl. 8 prikazani su stojni valovi u otvorenoj i zatvorenoj svirali s usnom za osnovni ton i dvije više harmonijske frekvencije. Prema navedenim relacijama za zadanu duljinu l svirale može se izračunati frekvencija. Npr. uz $l = 0,5$ m osnovna je frekvencija $f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{4l} = 165,5$ Hz, što približno odgovara tonu e.



Sl. 8. Stojni valovi: a u otvorenoj i b u zatvorenoj svirali s usnom; c jakost pojedinih nadvalova u otvorenoj cijevi i u otvorenoj cijevi s rupicom sa strane

U tom razmatranju nije uzet u obzir faktor korekcije. Za zatvorene cijevi prilično dobro vrijede već navedene zakonitosti, dok za otvorene cijevi to ne vrijedi. Potrebno je napomenuti da otvorena cijev nije, npr., akustički kratki spoj (slično kao kratkospojni vod; v. *Elektroakustika*, TE 4, str. 300), već je to spoj zaključen impedancijom zračenja koja je na niskim frekvencijama mnogo manja od karakteristične impedancije cijevi, ali nije zanemarljiva prema zvučnoj induktivnosti cijevi. To se može protumačiti i drugačije: iz otvorenih cijevi zvučna energija zrači snažno kroz otvor u zvučno polje. Zrak u cijevi širi se u obliku ravnih valova, a izvan nje kao kuglasti val. Pri tom nastaju promjene koje se mogu uskladiti s prije navedenim zakonitostima, ako se pretpostavi da cijev ne završava na svom geometrijskom završetku, već nešto dalje u prostoru. Geometrijsku duljinu l_g jednostrano otvorene cijevi treba u računanju tada korigirati povećanjem za duljinu a , znači $l = l_g + a$, a obostrano otvorene cijevi za $2a$, znači $l = l_g + 2a$.

Rubna korekcija koju treba u realnom slučaju uzeti u obzir ovisi o omjeru promjera i duljine cijevi i o obliku završetka cijevi; za cijev bez ruba korekcija iznosi $a = 0,62r$, a za cijev s rubom $a = 0,82r$, gdje je r polumjer cijevi (J. W. S. Rayleigh, H. L. F. Helmholtz, H. Levin, J. Schwinger).

Za izračunavanje rubne korekcije orguljskih svirala potrebno je složenije teorijsko razmatranje. Valja razlikovati tzv. pasivnu korekciju na kraju rezonatora otvorene svirale i tzv. aktivnu korekciju na ustima svirale. Za pasivnu korekciju korekcijska duljina ovisi o omjeru valne duljine i promjera otvora, pa je efektivna duljina svirale to veća što je valna duljina manja. Za aktivnu korekciju korekcijska duljina i fazni kut ovise o brzini zračne struje na ulazu i efektivnoj dubini usta.

Za cijev pravokutnog presjeka rubna korekcija dobiva se iz izraza $a = 0,187(h + d)$, gdje je h širina, a d debljina cijevi. Materijal cijevi pri tom utječe na korekciju.

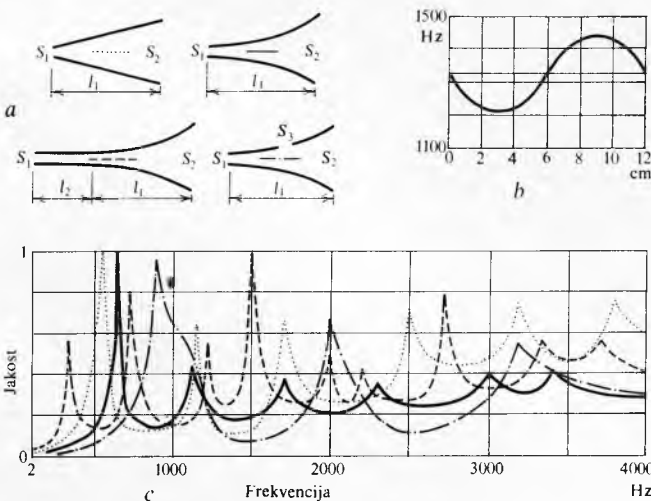
Bez rubne korekcije osnovni bi se ton otvorene cijevi, kad bi bila zatvorena, snizio točno za oktavu. Zbog korekcije snizuje se ton manje od oktave, tj. približava se velikoj septimi. Dakle, korekcijska duljina treba biti dodana geometrijskoj duljini, jer je efektivna duljina cijevi važna za točno određivanje rezonantne

frekvencije. Interesantno je da za cijevi kojima se kraj ljevkasto širi prema otvorenom kraju, a granični je polumjer veći za $\sqrt{2}$, ne treba rubne korekcije, dakle vrijedi $f_0 = c/(4l)$. O nastajanju pobude (duhanja) bitno ovisi osnovni ton. Uz jače duhanje svirala obično zazvuči na višem alikvotnom tonu. To isto vrijedi ako se jače pritisne jezičac ili napinje usnica. Svaku cijev nije moguće jednako pobuditi. Titranje zraka u cijevi ovisi o šupljini, odnosno o tzv. menzuri svirale. Viši tonovi nastaju lakše u užim cijevima. Osnovne frekvencije javljaju se pri vrlo širokim cijevima. U cijevi srednje menzure mogu se pobuditi gotovo svi alikvotni tonovi. Temperatura zraka u cijevi utječe na visinu tona. Što je viša temperatura zraka, to je viša frekvencija kojom titra zrak u cijevi, jer je veća brzina zvuka, prema relaciji $c = c_0 \sqrt{1 + t}$ gdje je t Celzijeva temperatura. Za svako povišenje temperature zraka za 1°C povećava se visina tona približno za 1 cent, tj. za $1/1200$ oktave.

Utjecaj otvora sa strane. Otvor, rupica koja je malena s obzirom na presjek cijevi, ne djeluje na ton svirale ako se nalazi na mjestu čvora stojnog vala zvučnog tlaka ili pokraj njega. Istraživanja o utjecaju otvora na stijenki cijevi pokazala su sljedeće zakonitosti: a) pri određenoj veličini rupica koja se nalazi na mjestu čvora stojnog vala zvučnog tlaka ne utječe na visinu tona; b) ako se otvor nalazi na mjestu trbuha zvučnog tlaka ili čvora titrajne brzine, on uzrokuje dva nova čvora titrajne brzine. Dakle, povećava se visina tona, a istodobno se smanjuje amplituda zvučnog tlaka. Ako je rupica veća, ton se povisuje; c) rupica koja se nalazi između trbuha i čvora ne stvara nove pojave, već samo malo uvećava prije opisane.

Svirala ima mali rub (sl. 8c), a rupica se nalazi u sredini. Osnovna rezonantna frekvencija za promatranu cijev bez otvora iznosi 500 Hz, a s rupicom u sredini povisuje se na 800 Hz. Više harmonijske frekvencije promijenile su se kako je prikazano na sl. 8. Dakle, s otvorom koji je manji od $1/4$ presjeka dobiva se zvuk karakterističan za otvorenu cijev; pojavljuju se parne i neparne više harmonijske frekvencije.

Truba i lijevak. Truba, valjkasta cijev promjenljiva presjeka, veoma se često upotrebljava u elektroakustici i to pri izvedbi zvučničkih sustava, dakle elektroakustičkih pretvarača koji pretvaraju električnu u akustičku energiju. Pomoću elektroakustičkih analogija uvedeni su pojmovi otpor zračenja i akustička impedancija koji omogućuju razmatranje trube, lijevka ili roga. Na sl. 9 a prikazane su trube različitih oblika: konusne, ekspanzionalne, parabolične i hiperekspanzionalne, a na sl. 9 b vide se promjene frekvencije s promjenom duljine cijevi. Takve se cijevi većinom upotrebljavaju za glazbene instrumente i odavno



Sl. 9. Trube različitih oblika. a četiri osnovna oblika truba: konusna, ekspanzionalna, parabolična i hiperekspanzionalna (s rupicom), b promjena frekvencije zvuka s promjenom duljine cijevi, c rezonantne pojave u četiri trube (vrsta crtnje svake krivulje označena je u svakoj pojedinoj trubi na sl. a)

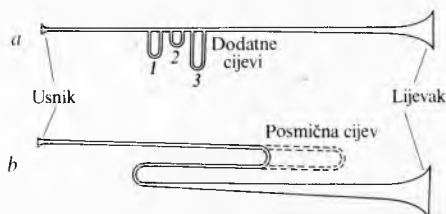
se upotrebljavaju za sviranje i prenošenje ljudskog glasa na veće udaljenosti (megafon).

Iste zakonitosti koje vrijede za valjkaste cijevi mogu se primijeniti i za rogove s blagom strmišom stijenki (J.W.S. Rayleigh). Također im se i rezonantne frekvencije malo razlikuju od frekvencija jednako dugih valjkastih cijevi.

Ako se na isti način pobudi titranje konusne ekspanzionalne i kombinirane (cilindrično-ekspanzionalne) trube tada se može ustanoviti da su u konusnim i ekspanzionalnim trubama najjače izraženi osnovni tonovi, a u kombiniranim prva i druga harmonijska frekvencija. U kratkoj konusnoj svirali više su harmonijske frekvencije brojnije i većeg intenziteta. U ekspanzionalnoj cijevi nadvalovi su manjeg intenziteta i uglavnom ne stoje u harmonijskom odnosu. Ako se rupica nalazi na sredini ekspanzionalne trube, rezonantna se frekvencija osnovnog tona povisuje od 650 na 900 Hz. Rupica povećava djelotvornost nastajanja viših harmonijskih frekvencija. Uz to vrijedi i prije spomenuto djelovanje da je duhanje u sviralu to teže što se pobuđuje više viših harmonijskih frekvencija.

Veoma je važno svojstvo vrlo otvorenih rogova da nemaju vlastitih rezonancija, pa je to veoma korisno.

U glazbalima oblika trube frekvencija, odnosno visina tona, mogu se mijenjati s rupicama (trublja, klarinet, oboa, flauta itd.), ili promjenom duljine trube. Promjena duljine u duhačkim glazbalima može se izvesti ventilima (trublja, saksofon, francuski rog), ili povlačenjem cijevi (trombon). Kad se mijenja visina tona pomoću ventila, uključuju se pojedini dijelovi cijevi (1, 2 i 3 na sl. 10), ili njihove kombinacije (1 + 2, 1 + 3, 2 + 3, 1 + 2 + 3).

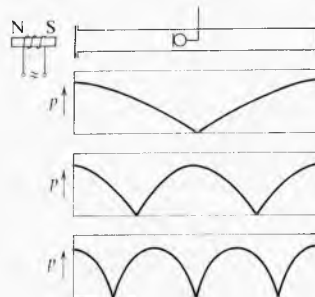


Sl. 10. Načini mijenjanja visine tona: a ventilima, b povlačenjem cijevi (1, 2 i 3 dijelovi cijevi koji se uključuju ventilima)

Interesantno je da materijal od kojeg je izvedena svirala utječe na zvuk. Dosadašnja su ispitivanja pokazala da materijal od kojeg su izvedene stijenke svirale malo utječe na boju zvuka, uz uvjet da su stijenke izvedene od tvrdog materijala. U glazbalima loše tonske kvalitete, npr. u flauti i klarinetu, pojavljuje se tzv. vučji ton zbog toga što je longitudinalni ton štapa približno rezonantnoj frekvenciji zvučnog stupca svirale. U limenim duhačkim glazbalima pri jačim glasnoćama proizvedeni zvuci pobuđuju na titranje stijenke glazbala. Međutim, vanjski zidovi zrače tako malim intenzitetom da se mogu posve zanemariti.

Istraživanja na flautama izvedenima od različitih materijala pokazala su da oni ne utječu mnogo na zvučna svojstva, izuzimajući pri tom zagrijavanje i mehaničke posebnosti.

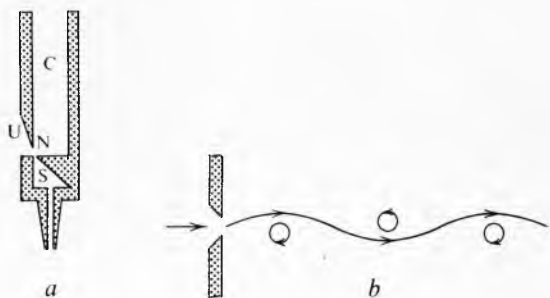
Nastajanje stojnog vala u svirali. Dosad su razmatrane rezonantne pojave u svirali bez obzira na to što pobuđuje zrak u svirali. Pobuđivanje zračnog stupca na istu ugodenu rezonantnu frekvenciju zvučnog polja nema veće akustičko značenje,



Sl. 11. Kundtova cijev i raspodjela zvučnog tlaka u stojnim valovima unutar cijevi

iako se rezonancijom može veoma povećati zračenje nekih emitera (zvučna palica, glazbena vilica itd.). Razmjerno jednostavno nastaju stojni valovi u zatvorenoj cijevi koju je 1866. godine izveo A. Kundt (sl. 11). Takva cijev služi pri mjerenju u akustici i dobila je naziv Kundtova cijev.

Svirala s usnom. Takva je svirala (sl. 12a) aerodinamički zvučni izvor u glazbenoj akustici duhačkih i kompresijskih glazbala. Pobudna stalna zračna struja prolazi kroz nogu, ulazi u sapnicu, prolazi kroz procijep i dolazi iznad usta na oštricu, tzv. gornju usnu na koju se dalje nastavlja rezonantna cijev. Usna dijeli, odnosno reže zračni mlaz koji struji iz procijepa. Pri tom nastaje tzv. rezni ton. Najprije će se razmotriti pojave koje nastaju kada nema rezonantne cijevi. Za dobivanje reznog tona potrebna je neka najmanja udaljenost d između usnice i procijepa. Ta udaljenost ovisi o brzini strujanja zraka kroz procijep i o oštirini otvora. Povećanjem udaljenosti d na $2d$ rezni se ton povisuje za oktavu, tako da ton zazvuči na frekvenciji koju je davao uz udaljenost d . Kad zračna lamela koja titra dođe na oštricu (gornju usnicu), na oštirci se formiraju vrtlozi (sl. 12b). U trenutku kada vrtlog dosegne oštricu, zrak se zaustavi i dobiva se sličan udar kao kad se baci kamen na površinu vode. Titranje koje je prouzročilo sudar širi se brzinom zvuka sve do procijepa gdje uzrokuje novi vrtlog. Budući da se zvuk širi brže od zračne struje između procijepa i oštrice opet nastaje novi vrtlog. Iz toga slijedi da je d ujedno i udaljenost između dva susjedna vrtloga, pa je frekvencija reznog tona $f = nd_1$, gdje je n brzina zračne struje i vrtloga, a d_1 udaljenost između oštrice i procijepa. Zvuk u svirali s usnom ovisi u prvom redu o širini i obliku usne i usnice.



Sl. 12. Svirala sa zračnim mlazom. a shematski presjek svirale s usnom (S sapnica, N nos, U usnica, C cijev), b nastajanje vrtloga pri naglom prolazu zvučnog mlaza kroz procijep

Dodavanjem rezonatora čitava se pojava mijenja. Tada nastaju vrtlozi s frekvencijom koja je jednaka najbližem vlastitom tonu svirale. Ton koji nastaje u svirali s usnom ovisi o intenzitetu zračne struje.

Na osnovi iskustva može se reći da svirala s usnom djeluje dobro tek onda ako su rezni ton i vlastiti ton svirale međusobno ugođeni. Dakle, svirale s usnom pobuđivane su stalnom zračnom strujom koja ulazi u cijev i izlazi iz nje, ili nastaju vrtlozi pri rezonantnoj frekvenciji sustava, pa se stalno strujanje zraka pretvara u izmjenično. Zbog nelinearne karakteristike pobudne sile i brojnih rezonantnih elemenata u sustavu nastaje titranje s osnovnom frekvencijom i višim harmonijskim frekvencijama.

Na toj osnovi može se rastumačiti i nastanak zvuka u flauti, zviždaljci i u sličnim sviralama.

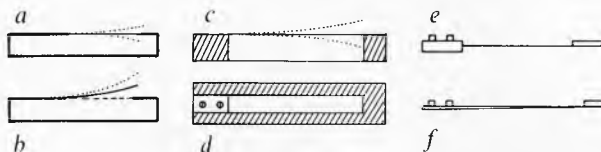
Svirala s jezičcem. Kako se zvuk svirala s jezičcem mnogo razlikuje od prije opisanih, pojavljuju se osobitosti kojih nemaju svirale s usnom. Jezičac (metalna pločica s površinom oko pola četvornog centimetra) daje bogatiji i snažniji zvuk nego neko složenije glazbalo.

Svirala s jezičcem pobuđivana je stalnom zračnom strujom koju prekida mehanički jezičac, i stvara zračni izmjenični tok kojemu frekvencija odgovara frekvenciji jezičca povezanog s akustičkim sustavom. Postoje piskovi s jednim jezičcem i s dvostrukim jezičcem.

Najjednostavniji jezičac je jednako debeli listić od mjedi. Obično je tako izrađen da precizno pokriva otvor u kojemu

ili iznad kojeg je smješten. Djelovanjem nadtlaka ili podtlaka jezičac titra u otvoru ili iznad njega (sl. 13).

Oblik jezičca djeluje na boju tona. Zato se za pojedina glazbala (harmonika, harmonij) osim jezičca jednakog presjeka upotrebljavaju jezičci s više ili manje zadebljanim krajevima. Visina tona jezičca ovisna je o elastičnosti materijala iz kojeg je izrađen, te o njegovoj masi i obliku, jer se jezičac može promatrati kao pravokutna ravna ploča učvršćena na užem kraju.



Sl. 13. Oblici jezičca za svirale. a jezičac slobodan na jednom kraju, b jezičac ograničen na jednom kraju, c i d nacrt i tlocrt slobodnog jezičca u okviru, e i f jezičac opterećen na jednom kraju

Jezičac se upotrebljava kao direktni emiter u zrak (harmonij, harmonika) ili povezan s rezonatorom (orguljska svirala, klarinet, saksofon, gajde). Tada rezonantne frekvencije svirale i rezonatora moraju biti međusobno ugođene. U glazbalima s dvostrukim jezičcem kombinira se rezonancija zračnog stupca s titranjem jezičca (oboa, engleski rog, fagot, saksofon).

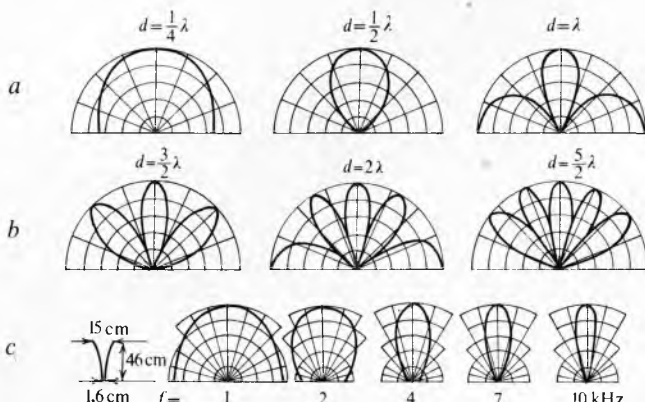
Usmjerna karakteristika zvučnih izvora jest karakteristika jedne od izlaznih veličina (npr. zvučnog tlaka) kao funkcije kuta α prema osi sustava. Karakteristika zračenja zvučnih izvora glazbala veoma je složena, jer često svako glazbalo sadrži mnogo različitih zvučnih izvora. Razmatranja nekih jednostavnijih zvučnih emitera sustava daju uvid u usmjerna svojstva koja se mogu primijeniti i na glazbala.

Niz točkastih izvora. U mnogim glazbalima postoji nekoliko malih zvučnih izvora, npr. rupice duhačkih glazbala ili svirale orgulja. Zbog nesimetričnog prostornog rasporeda usmjerna je karakteristika veoma složena. Međutim, razmatranja niza jednakih točkastih izvora smještenih u jednoj liniji daju načelni uvid u usmjernu karakteristiku mnogo složenijih sustava. Usmjerna karakteristika koju daje više jednakih točkastih izvora, koji titraju u fazi i koji su smješteni u ravnoj liniji i na međusobno jednakim udaljenostima, određena je izrazom:

$$R = \frac{\sin\left(\frac{n\pi d}{\lambda} \sin\alpha\right)}{n \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\alpha\right)}, \quad (20)$$

gdje je R omjer zvučnog tlaka za neki kut α i zvučnog tlaka za kut $\alpha = 0$, n broj izvora, d udaljenost između izvora, a λ valna duljina. Usmjerna karakteristika dvaju točkastih zvučnih izvora prikazana je na sl. 14a i b.

Emitirajuće površine nekih instrumenata sastoje se od okruglih, ravnih titrajućih površina, npr. bubanj, bendžo itd. Usmjerne



Sl. 14. Usmjerne karakteristike dvaju točkastih izvora koji titraju u fazi, kao funkcije udaljenosti od izvora izražene u valnim duljinama (a) i (b), te male eksponencijalne trube kružnog presjeka, za različite frekvencije (c)

karakteristike prikazane su u članku *Akustika*, TE 1, str. 62. Važne su još i usmjerene karakteristike pravokutnih izvora, te cilindričnih, npr. truba (sl. 14c).

KARAKTERISTIKE GLAZBALA

Pri snimanju glazbenog i govornog programa, pri tzv. procesiranju glazbenog signala i pri konstruiranju elektroničkog glazbenog instrumenta koji zamjenjuje klasična glazbala, potrebno je poznavati karakteristike pojedinih glazbala i svojstva skupine glazbala, te utjecaj drugih faktora koji djeluju na zvučnu sliku (npr. prostor i sl.).

Iako su klasična glazbala još uvijek najvažnija za današnju glazbu, elektronički glazbeni instrumenti, bilo da se temelje na klasičnim glazbalima ili stvaraju novu zvučnu sliku, dopunjavaju klasična glazbala i postaju sastavni elementi suvremene glazbe.

Princip rada i opis pojedinih klasičnih glazbala zahtijeva mnogo prostora. Osnovni principi karakteristični za neke skupine glazbala dosad su obrađeni, a pojednosti se iscrpno razmatraju u teoriji glazbenih instrumenata. Ovdje će biti spomenute samo osnovne karakteristike, s tim da će klasične orgulje koje su preteča elektroničkih instrumenata biti posebno obrađene.

Postoje tonske i dinamičke karakteristike glazbala. Tonska je karakteristika frekvencijski opseg glazbala i boja tona, a dinamička karakteristika ovisi o najjačem i najslabijem intenzitetu zvuka glazbala. Obje karakteristike ovisne su o načinu nastajanja i prekidanja tona, te o usmjernoj karakteristici.

Da bi slušalac mogao doživjeti glazbu, mora imati osjet za visinu tona, za glasnoću, za takt i za boju tona. Sva ta objektivna svojstva u slušatelju pobuđuju subjektivan osjećaj. Ona se pojavljuju u složenim muzičkim oblicima: u harmoniji, melodiji, dinamici i ritmu, te u punoći i kvaliteti tona. Na te muzičke oblike, bez obzira da li se radi o reprodukciji ili se glazba sluša izvorno, djeluje položaj zvučnog izvora i akustika okoliša.

Karakteristike glazbenog zvuka

Karakteristike koje mogu imati ili imaju glazbeni tonovi jesu: *osnovna frekvencija* koja određuje visinu tona, *spektralni sastav* o kojemu ovisi boja tona, *glasnoća*, *vremenski tok intenziteta* u kojemu se razlikuje početno prijelazno stanje (početni tranzijent), stacionarno stanje i završno prijelazno stanje (završni tranzijent), *portamento* (kontinuiran prijelaz s tona jedne na ton druge frekvencije), *glisando* (kontinuirano prelaženje preko svih međutonova), te na kraju *tremolo* (amplitudna modulacija) i *vibrato* (niskofrekvencijska modulacija glazbenog tona, koja može biti kombinacija frekvencijske i amplitudne modulacije; najčešća je modulacijska frekvencija od ~7 Hz).

Prosječno ljudsko uho može razlikovati oko 1400 diskretnih frekvencija. U glazbenim ljestvicama ima ih ipak samo 120, nazvanih glazbenim tonovima (v. *Elektroakustika*, TE 4, str. 302).

Visina tona je subjektivna karakteristika koja je u prvom redu određena frekvencijom, ali donekle i glasnoćom tona. Apsolutna visina tona izražava se frekvencijom, a u glazbi najčešće standardiziranim nazivom tona u glazbenoj ljestvici.

Relativna visina tona frekvencije f_2 jest relativna razina prema tonu frekvencije f_1 , koja se naziva i glazbeni ili muzički interval Δ tih tonova. Ona ovisi o logaritmu omjera njihovih frekvencija

$$\Delta = k \log_2 \frac{f_2}{f_1} \quad (21a)$$

Osnovni je glazbeni interval onaj za koji je omjer frekvencija 2. Zato se upotrebljava logaritam po osnovi dva i definira omjerna jedinica *oktava* kao interval dvaju tonova kojima je $f_2/f_1 = 2$, a $k = 1$, dakle interval je izražen u oktavama relacijom

$$\Delta = \log_2 \frac{f_2}{f_1} \text{ oktava} \quad (21b)$$

Oktava se dijeli na manje jedinice koje su, općenito, $1/k$

oktave i za koje je omjer frekvencija $f_2/f_1 = \sqrt[k]{2}$. To su *cent* ($k = 1200$), *milioktava* ($k = 1000$), *centiton* ($k = 600$) i *oktavni centimetar* ($k = 100$).

Osim njih upotrebljava se i jedinica *savar* (prema F. Savartu, znak σ) ako je interval definiran dekadskim logaritmom omjera frekvencija

$$\Delta = 1000 \lg \frac{f_2}{f_1} \sigma \quad (22)$$

Za omjer frekvencija intervala 1σ vrijedi $f_2/f_1 = \sqrt[1000]{2}$, oktava sadrži 301,036 $\sigma \approx 300 \sigma$. Međusobni odnosi jedinica glazbenog intervala navedeni su u tabl. 1.

Glazbeni intervali od kojih se slažu glazbene ljestvice izražavaju se nekom od manjih jedinica oktave. Tako su npr. intervali u temperiranoj *c-dur*-ljestvici (u kojoj se ugađaju tonovi glasovira): sekunda = 200 centa, terca = 400 centa, kvarta = 500 centa, kvinta = 700 centa, velika seksta = 900 centa, velika septima = 1100 centa i oktava = 1200 centa (v. *Elektroakustika*, TE 4, str. 302).

Tablica 1
MEĐUSOBNI ODNOSI JEDINICA GLAZBENOG INTERVALA

Jedinica intervala		O	C	mO	ct	σ	ocm
Naziv	Znak						
Oktava	O	1	1200	1000	600	300	100
Cent	C	$\frac{1}{1200}$	1	0,83	0,5	0,25	0,083
Milioktava	mO	$\frac{1}{1000}$	1,2	1	0,6	0,3	0,1
Centiton	ct	$\frac{1}{600}$	2	1,6	1	0,5	0,16
Savar	σ	$\frac{1}{300}$	4	3,3	2	1	0,3
Oktavni centimetar	ocm	$\frac{1}{100}$	12	10	6	3	1

Apsolutna razina tona je logaritam omjera njegove frekvencije f prema frekvenciji f_0 referentnog tona

$$\Delta_a = \lg \frac{f}{f_0} \quad (23)$$

a izražava se jedinicom *okta* ako je referentni ton $f_0 = 125$ Hz.

Subjektivna visina tona izražava se prema tzv. *mol-ljestvici*, utvrđenoj pokusima (G. G. Stevens, 1938). Tonu s razinom glasnoće 40 ph iznad praga čujnosti pridružena je u toj ljestvici za $f = 50$ Hz vrijednost 0 mel, a za $f = 1000$ Hz vrijednost 1000 mel.

Nazivi tonova. Glazbeni tonovi razvrstani u oktave nazivaju se prema slovnom označivanju. Za to služi sedam slova tzv. glazbene abecede: *c, d, e, f, g, a i h*, te pomoćni znakovi za polutonove: povišilica $\sharp$ i snizilica $\flat$. Nazivi povišenih ili sniženih tonova nastaju dodavanjem nastavka: za jedanput povišen ton *-is*, za dva puta povišen ton *-isis*, za jedanput snižen ton *-es*, te za dva puta snižen ton *-ses* ili *-sas*. Prema tim se znakovima tonovi i polutonovi zovu: *ce, cis* ili *des, de, dis* ili *es, e, ef* ili *eis, fis* ili *ges, ge, gis* ili *as, a, ais* ili *be i ha*. Osnovnih sedam tonova oktave nazivaju se i tzv. solmizacijskim slogovima: *do* ili *ut, re, mi, fa, sol* ili *so, la i ti* ili *si*.

Tonovi su raspoređeni u deset oktava koje se zovu počevši od najniže: *supkontra, kontra, velika, mala, prva, druga, treća, četvrta, peta i šesta* oktava. Pripadnost tona pojedinoj oktavi opisuje se nazivom te oktave, velikim ili malim slovom glazbene abecede, te brojkom u indeksu ili u eksponentu (tabl. 2). Tako su npr. nazivi i znakovi tona *ce* u svim oktavama: *supkontra ce* (C_2), *kontra ce* (C_1), *veliki ce* (C), *mali ce* (c), *ce jedan* (c^1), *ce dva* (c^2), *ce tri* (c^3), *ce četiri* (c^4), *ce pet* (c^5) i *ce šest* (c^6).

Nazivi intervala tonova navedeni su također u tabl. 2, a osim tih primjenjuju se i drugi, npr. povećana prima (*c-cis*), povećana sekunda (*c-dis*), povećana terca (*c-es*), smanjena terca (*c-eses*), smanjena kvarta (*c-fis*), povećana kvinta (*e-gis*) itd., te intervali veći od oktave: nona, decima, undecima, duodecima, tredecima, kvartdecima, kvintdecima.

Označivanje tonova. U glazbi se tonovi, njihova visina, trajanje i druga svojstva označuju posebnim znakovima, tzv. notama i pomoćnim znakovima, raspoređenim u sustavu notnog crtovlja.

Notno crtovlje je skup nekoliko (danas je to pet) paralelnih crta (sl. 15a). Na crte i između crta upisuju se note, te se tako zorno predodžuje visina tona. Područje označivanja proširuje se pomoćnim crticama za svaku notu, ispod i iznad osnovnog crtovlja (sl. 15b).

Apsolutnu visinu tona određuje tzv. **notni ključ** koji se stavlja na početak notnog crtovlja. Od mnogih koji su se upotrebljavali do danas su ostali: *violinski* ili *G-ključ*, *bas* ili *F-ključ*, te *alt C-ključ* i *tenor C-ključ* (sl. 15c).

Note su znakovi za relativno trajanje tona, a položajem u notnom crtovlju određuje se visina tona (sl. 15d). Apsolutno trajanje tona određuje se posebnim označivanjem tempa skladbe. Točkom uz pojedinu notu označuje se produženje trajanja za polovicu.

a

b

c

G-ključevi F-ključevi

francuski standardni bariton bas

C-ključevi

sopran mezzosoprano alt tenor

d

Trajanje	Nota	Stanka
Nota i stanika brevis		
Cijela		
Polovinka		
Četvrtinka		
Osminka		
Šesnaestinka		
Tridesetdruginka		
Šezdesetčetvrtinka		
Stodvadesetosminka		

Tablica 2

INTERVALI POJEDINIH GLAZBENIH TONOVA I POLUTONOVA U OKTAVI PREMA POČETNOM TONU

Naziv tona	Opći znak tona*	Omjer s prvim tonom oktave**	Interval od prvog tona oktave cent	Naziv intervala
ce	C	$\sqrt[12]{2^0} = 1$	0	čista prima
cis, des	C [#] , D ^b	$\sqrt[12]{2^1} \approx 1,059463$	100	mala sekunda
de	D	$\sqrt[12]{2^2} \approx 1,122462$	200	velika sekunda
dis, es	D [#] , E ^b	$\sqrt[12]{2^3} \approx 1,189207$	300	mala terca
e	E	$\sqrt[12]{2^4} \approx 1,259921$	400	velika terca
ef, eis	F, E [#]	$\sqrt[12]{2^5} \approx 1,334840$	500	čista kvarta
fis, ges	F [#] , G ^b	$\sqrt[12]{2^6} \approx 1,414214$	600	povećana kvarta smanjena kvinta
ge	G	$\sqrt[12]{2^7} \approx 1,498307$	700	čista kvinta
gis, as	G [#] , A ^b	$\sqrt[12]{2^8} \approx 1,587401$	800	mala seksta
a	A	$\sqrt[12]{2^9} \approx 1,681793$	900	velika seksta
ais, be	A [#] , B ^b	$\sqrt[12]{2^{10}} \approx 1,781797$	1000	mala septima
ha	H	$\sqrt[12]{2^{11}} \approx 1,887749$	1100	velika septima
ce	C	$\sqrt[12]{2^{12}} = 2$	1200	čista oktava

*Unutar svake oktave tonovi se posebno označuju, velikim ili malim slovom i pripadnim brojem oktave (v. Tabl. 3)

**Prema standardiziranom tonu a¹ od 440 Hz

Stanke (pauze) su znakovi za privremeni izostanak tona, kojima je, kao i notama, određeno trajanje stanke (sl. 15d).

Povisilica i **snizilica** su znakovi kojima se označuje promjena visine tona za poluton.

Ostala svojstva glazbenih tonova unutar skladbe upisuju se uz notno crtovlje dodatnim znakovima ili primjedbama. Poje-

L'ARLÉSIEUNNE

Suite No. 2

No. 1 Pastorale

Georges Bizet
1838-1875

Andante sostenuto assai (♩ = 54)

2 Flauti
2 Oboi
1 Corno Inglese
2 Clarinetti in A
2 Fagotti
1 Altsaxofon in Es
2 Corni in A
2 Corni in E
2 Trombe in A
2 Cornetti à pistons in A
3 Tromboni
Timpani in A, E
Tambourin
Arpa o Piano
Violino I
Violino II
Viola
Violoncello
Contrabasso

Sl. 15. Označivanje glazbenih tonova notama. a notno crtovlje, b pomoćne crte, c notni ključevi, d oblici nota i znakovi stanki, e primjer glazbene kompozicije

dine manje skupine tonova, tzv. *taktovi*, odjeljuju se crtom okomitom na notno crtovište. *Ritam* se upisuje kao naziv, npr. karakterističnog plesa (valcer, tango, rumba). *Mjera* se označuje razlomkom upisanim u notno crtovište odmah iza ključa. *Tempo* se upisuje iznad notnog crtovišta na početku stavka na koji se odnosi, obično ustaljenim talijanskim nazivima (andante, moderato, allegro, grave). Ponekad se uz naziv tempa dodaje broj metronomskih udaraca u minuti, npr. M.M. = 72 (kratica za Mälzelov metronom) a znači da četvrtinka treba trajati 1/72 minute. *Dinamika* (stupnjevanje glasnoće) označuje se nazivima ili znakovima dinamičkih stupnjeva, ustaljenim talijanskim nazivima: npr. piano (p), forte (f), mezzopiano (mp), mezzoforte (mf) itd., a promjena dinamičkog stupnja nazivima: crescendo (cresc.) i decrescendo (decresc.) ili diminuendo (dim.). Osim toga, uz pojedine stavke, taktove i note stavljaju se i pobliža tumačenja o načinu izvođenja.

Standardni ton. Da bi se istodobno moglo upotrebljavati nekoliko glazbala za skupno muziciranje, prijeke je potrebno odrediti frekvenciju jednog osnovnog tona. Taj se ton zove standardni, normalni ili komorni ton ili diapason. Danas je to ton a^1 , tj. seksta u prvoj oktavi, kojemu je dogovorena frekvencija 440 Hz. Ugađanje na taj ton zove se apsolutno ugađanje.

Prvi prijedlog za standardni ton pojavio se 1619. god. u Njemačkoj (Praetorius) kao crkveni ton $a^1 = 567$ Hz. Kasnije su u Njemačkoj usvajane frekvencije između 375–500 Hz, a u Velikoj Britaniji 395–474 Hz.

U XVIII stoljeću standardni je ton bio u granicama 415–430 Hz. U drugoj polovici XIX st. u Francuskoj je bio usvojen $a^1 = 435$ Hz, u SAD 440 Hz, a u Velikoj Britaniji 450 Hz.

Još prije drugoga svjetskog rata međunarodna komisija za standardizaciju (ISO) predložila je i usvojila standardni ton $a^1 = 440$ Hz uz $t = 15^\circ\text{C}$. Poneki glazbenici, npr. gudači, ugađaju svoja glazbala više, npr. prema tonu $a^1 = 445$ Hz, jer tako i manje kvalitetna glazbala bolje zvuče.

Nazivi oktava i tonova, standardizirani znakovi i frekvencije tonova navedeni su u tabl. 3.

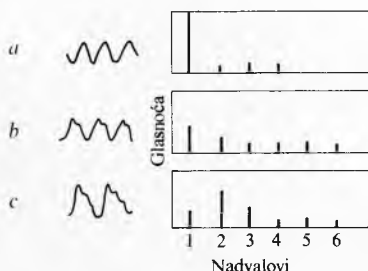
U glazbenim pojmovima postoji apsolutna i relativna pogreška ugađanja frekvencije. Apsolutna je pogreška odstupanje visine tona koja je određena prema $a^1 = 440$ Hz. Relativna je pogreška odstupanje prema pripadnom tonu najgorje oktave glazbala.

Relativna se pogreška lakše osjeti nego apsolutna, jer direktno utječe na konsonanciju intervala, dok pri apsolutnoj pogrešci glazbalo ne zvuči razgledeno. Apsolutna je pogreška važna kad se radi o zajedničkom sviranju skupine glazbala. Budući da je ugađanje subjektivno, teško je odrediti granice odstupanja frekvencija, jer je to ovisno o tonskom položaju, glazbeniku, vrsti glazbala itd. Za sva glazbala smatra se da su dobro ugođena, ako relativna pogreška nije veća od ± 1 cent, a apsolutna pogreška nije veća od ± 3 centa. Skupina glazbala ugađa se prema oboi koja se teško ugađa.

Frekvencijsko područje zvuka što ga proizvode glazbala jest 16–20000 Hz. Najniže osnovne tonove imaju orgulje 16 Hz, glasovir 27,5 Hz, kontrafagot 29 Hz, harfa 32 Hz, tuba 40 Hz i kontrabas 44 Hz. Ti su tonovi, međutim, slabiji nego njihove više harmonijske frekvencije, jer je valna duljina pri tako niskim frekvencijama mnogo veća od dimenzija glazbala, pa je emitiranje slabo. Najniži tonovi ostalih glazbala jesu: bas-trombon 55 Hz, francuski rog 62 Hz, violončelo 65 Hz, bubanj 87 Hz, klarinet 110 Hz, trublja 146 Hz i violina 190 Hz (v. *Elektroakustika*, TE 4, str. 302).

Od frekvencijskog područja koje zauzimaju osnovni tonovi pojedinih instrumenata opseg iznad a^4 (~ 3500 Hz) prelaze samo mala flauta, klavir i orgulje (4180 Hz). Najvišu frekvenciju za pojedine tonove predstavljaju više harmonijske frekvencije: bubanj 7000 Hz, bas-tuba 8000 Hz, harfa 11000 Hz, orgulje 13000 Hz, saksofon 14000 Hz, violina 16000 Hz i cimbali 18000 Hz.

Zvučni spektri glazbala. Ton neke note svirane na jednom od glazbala razlikuje se od tona iste note proizvedene drugim glazbalom. Jedan od razloga za tu razliku jest različit spektralni sastav tih tonova.



Sl. 16. Spektri istog glazbenog tona flaute, sviranog različitim glasnoćom: a) tiho, b) srednjeglasno, c) glasno

Tablica 3
OKTAVE, ZNAKOVI I PRIPADNE FREKVENCIJE
GLAZBENIH TONOVA

Oktava	Znak tona	Frekvencija Hz	Oktava	Znak tona	Frekvencija Hz
Supkontra	C_2	16,351	Druga	c^2	523,251
	$C_2^\sharp, D_2^\flat$	17,323		$c^2^\sharp, d^2^\flat$	554,365
	D_2	18,354		d^2	587,329
	$D_2^\sharp, E_2^\flat$	19,445		$d^2^\sharp, e^2^\flat$	622,253
	E_2	20,601		e^2	659,255
	F_2	21,826		f^2	698,456
	$F_2^\sharp, G_2^\flat$	23,124		$f^2^\sharp, g^2^\flat$	739,988
	G_2	24,499		g^2	783,991
	$G_2^\sharp, A_2^\flat$	25,956		$g^2^\sharp, a^2^\flat$	830,609
	A_2	27,500		a^2	880,000
Kontra	$A_2^\sharp, B_2$	29,135	Treća	$a^2^\sharp, b^2$	932,327
	H_2	30,867		h^2	987,766
	C_1	32,703		c^3	1046,502
	$C_1^\sharp, D_1^\flat$	34,647		$c^3^\sharp, d^3^\flat$	1108,730
	D_1	36,708		d^3	1174,059
	$D_1^\sharp, E_1^\flat$	38,890		$d^3^\sharp, e^3^\flat$	1244,507
	E_1	41,203		e^3	1318,510
	F_1	43,653		f^3	1396,912
	$F_1^\sharp, G_1^\flat$	46,249		$f^3^\sharp, g^3^\flat$	1479,976
	G_1	48,999		g^3	1567,982
Velika	$G_1^\sharp, A_1^\flat$	51,913	Četvrta	$g^3^\sharp, a^3^\flat$	1661,218
	A_1	55,000		a^3	1760,000
	$A_1^\sharp, B_1$	58,700		$a^3^\sharp, b^3$	1864,654
	H_1	61,735		h^3	1975,532
	C	65,406		c^4	2093,004
	$C^\sharp, D^\flat$	69,295		$c^4^\sharp, d^4^\flat$	2217,460
	D	73,416		d^4	2344,318
	$D^\sharp, E^\flat$	77,781		$d^4^\sharp, e^4^\flat$	2489,014
	E	82,406		e^4	2637,020
	F	87,307		f^4	2793,824
Mala	$F^\sharp, G^\flat$	92,498	Peta	$f^4^\sharp, g^4^\flat$	2959,952
	G	97,998		g^4	3135,964
	$G^\sharp, A^\flat$	103,826		$g^4^\sharp, a^4^\flat$	3322,436
	A	110,000		a^4	3520,000
	$A^\sharp, B$	116,540		$a^4^\sharp, b^4$	3729,308
	H	123,470		h^4	3951,064
	c	130,812		c^5	4186,008
	$c^\sharp, d^\flat$	138,591		$c^5^\sharp, d^5^\flat$	4434,920
	d	146,832		d^5	4698,636
	$d^\sharp, e^\flat$	155,563		$d^5^\sharp, e^5^\flat$	4978,028
Prva	e	164,813	Šesta	e^5	5274,040
	f	174,614		f^5	5587,648
	$f^\sharp, g^\flat$	184,997		$f^5^\sharp, g^5^\flat$	5919,904
	g	195,997		g^5	6271,928
	$g^\sharp, a^\flat$	207,652		$g^5^\sharp, a^5^\flat$	6644,872
	a	220,000		a^5	7040,000
	$a^\sharp, b$	233,081		$a^5^\sharp, b^5$	7458,616
	h	246,941		h^5	7902,128
	c^1	261,625		c^6	8372,016
	$c^1^\sharp, d^1^\flat$	277,182		$c^6^\sharp, d^6^\flat$	8869,840
Druga	d^1	293,664	Treća	d^6	9397,272
	$d^1^\sharp, e^1^\flat$	311,126		$d^6^\sharp, e^6^\flat$	9956,056
	e^1	329,627		e^6	10548,080
	f^1	349,228		f^6	11175,296
	$f^1^\sharp, g^1^\flat$	369,994		$f^6^\sharp, g^6^\flat$	11839,808
	g^1	391,995		g^6	12543,856
	$g^1^\sharp, a^1^\flat$	415,304		$g^6^\sharp, a^6^\flat$	13289,744
	a^1	440,000		a^6	14080,000
	$a^1^\sharp, b^1$	466,163		$a^6^\sharp, b^6$	14917,232
	h^1	493,883		h^6	15804,256

Prepoznavanje tona pojedinih glazbala ovisi, međutim, manje o spektralnom sastavu, a više o tranzijentima. Ako se početni i završni tranzijenti tonova uklone, teško se može prepoznati kojim je glazbalom ton proizveden.

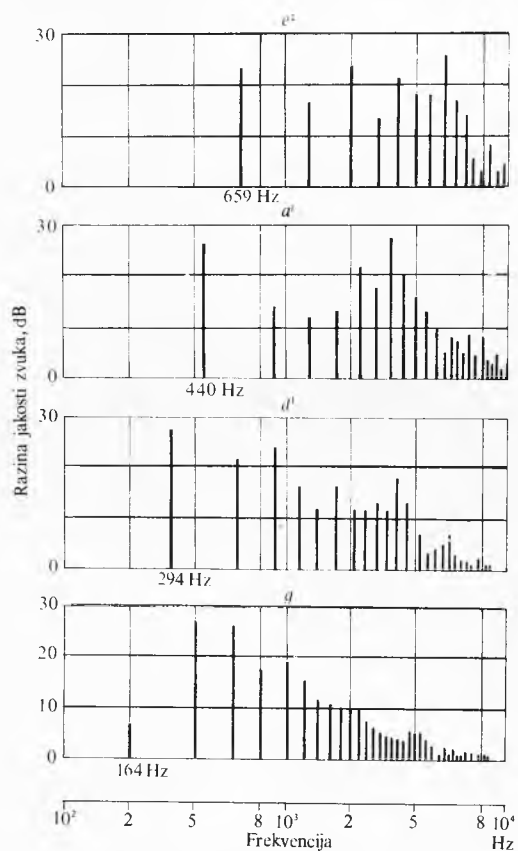
Spektralni sastav tonova ovisi i o glasnoći. Isti ton sviran na istom glazbalu, ali različitim glasnoćom, ima različit odnos amplituda nadvalova (sl. 16).

Usmjerna karakteristika glazbala. Već prema položaju slušaoca prema glazbalu mijenja se glasnoća i boja tona. Svako glazbalo ima na različitim frekvencijama i različite usmjerne karakteristike.

Radi uvida u svojstva pojedinih karakterističnih glazbala, bit će prikazani spektralni sastavi i usmjerne karakteristike glazbala prema već spomenutoj podjeli.

Žičana glazbala. Žice na glazbalima kao izvori zvuka mogu se pobuditi da titraju guđenjem (gudačka glazbala), udaranjem (žičana glazbala s batićem) ili trzanjem žice (trzalačka glazbala).

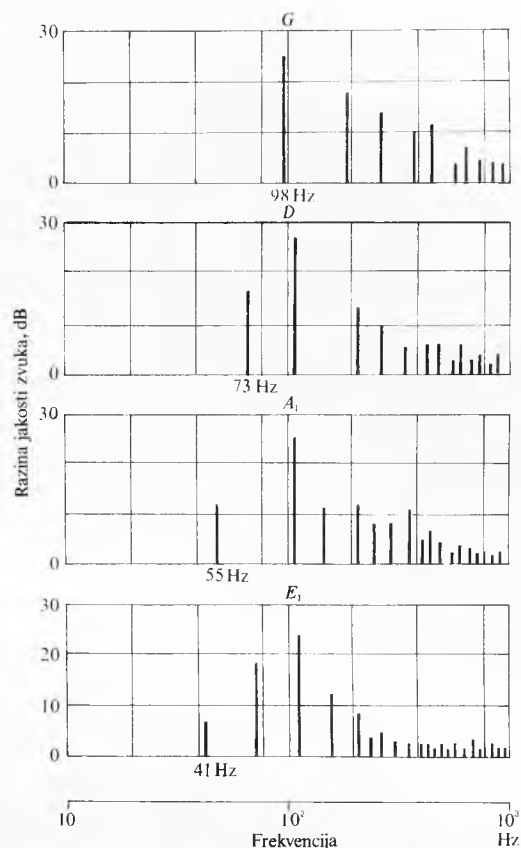
Violina je glavni predstavnik žičanih gudačkih glazbala. Spektri praznih žica prikazani su na sl. 17. Očita je razlika spektralnog sastava između visokih i niskih tonova. Niski su tonovi bogatiji višim harmonijskim frekvencijama. Violine i sva žičana glazbala imaju u spektru sve više harmonijske frekvencije, što svakako utječe na ljepotu tonova kojima je kvaliteta konstantna u cijelom opsegu glazbala.



Sl. 17. Spektri tonova praznih žica violine

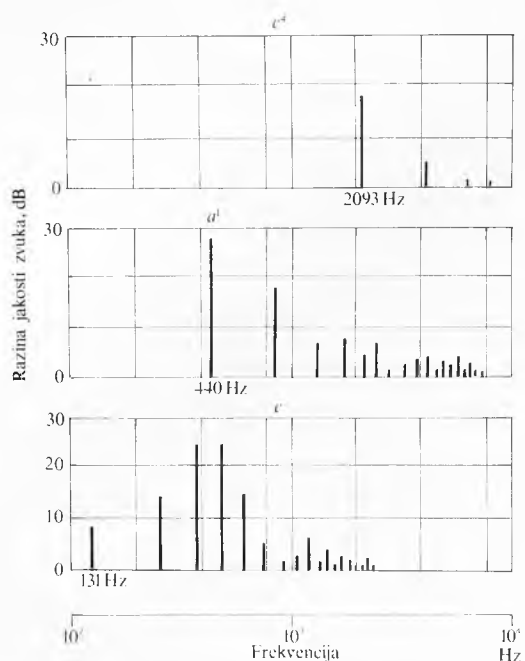
Kontrabas. Zvučni spektri praznih žica kontrabasa (sl. 18) slični su onima od violine i sadrže sve više harmonijske frekvencije. I tu su očite razlike u sastavu između visokih i niskih tonova. Niski su tonovi bogati višim harmonijskim frekvencijama. Osnovni tonovi ispod 100 Hz slabog su intenziteta. Naime, otpor zračenja titrajuće površine smanjuje se zbog smanjenog omjera njenih dimenzija i valne duljine. To uzrokuje slabiju akustičku vezu između žice i okolnog zraka, nastalu zbog manjeg otpora zračenja tijela glazbala na niskim frekvencijama.

Glasovir (klavir). Glasovir je glavni predstavnik žičanih glazbala s batićem. Frekvencijski je opseg tonova 27,5–4186 Hz ili A_2 do c^5 , dakle više od sedam oktava. Zvučni spektri triju tonova (sl. 19) pokazuju da glasovir također sadrži sve harmonijske komponente. Struktura viših harmonijskih frekvencija ovisi o načinu udaranja batića o žicu. Brzina batića ovisi o brzini tipke. Tonska kvaliteta ovisi o intenzitetu i načinu sviranja. Nadvalovi u višem frekvencijskom području naglo padaju s frekvencijom. Kvaliteta glasovirskog zvuka ujednačena je između



Sl. 18. Spektri tonova praznih žica kontrabasa

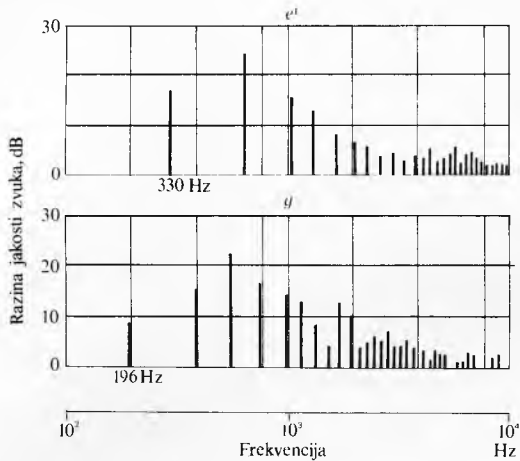
đu blizu tonova. Velike su razlike između tonova u niskim položajima i onih u višima. Duboki tonovi bogati su harmonijskim tonovima, jer se ne proizvode istom djelotvornošću kao viši tonovi. Razlog je tome već kod kontrabasa spomenuto smanjenje otpora zračenja na nižim frekvencijama, što slabi vezu između tijela i okolnog zraka. Zbog toga veći glasoviri zrače duboke tonove s većom djelotvornošću. Zbog većeg se tijela povećava otpor zračenja, što daje bolju vezu između žica i okolnog zraka. Glasovirski ton sadrži samo tranzijente porasta i opadanja, dok stacionarno stanje praktički ne postoji.



Sl. 19. Spektri triju tonova glasovira

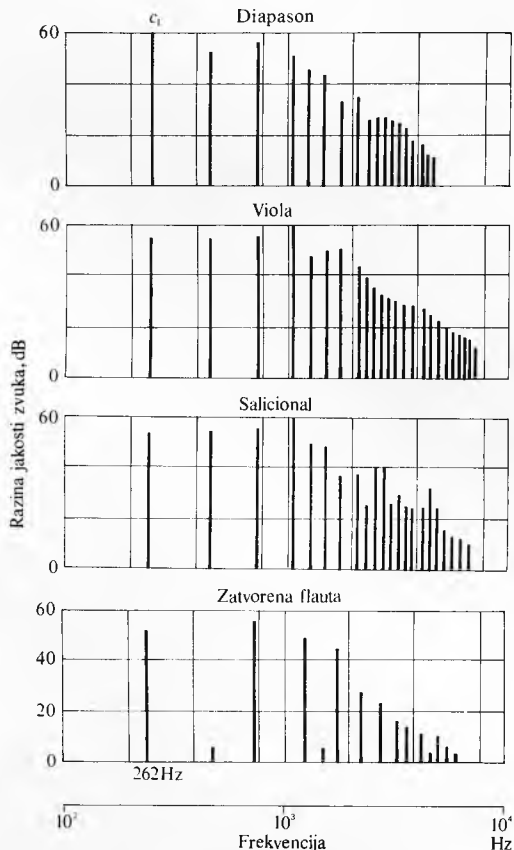
Za vrijeme porasta i opadanja postoje znatne promjene u frekvencijskom spektru. Spektri na sl. 19 odnose se na vrijeme opadanja.

Gitara je predstavnik trzalačkih žičanih glazbala. Zvučni spektri dviju praznih žica e^1 i g (sl. 20) pokazuju da su prisutne sve harmonijske komponente. Kao i kod glasovira, sastav spektra ovisi o intenzitetu kojim se žice pobuđuju. Ton gitare isto ima tranzijentni karakter, tj. tranzijent porasta i opadanja bez stacionarnog stanja, a spektri na sl. 20 snimljeni su za vrijeme opadanja.



Sl. 20. Spektri tonova dviju praznih žica gitare

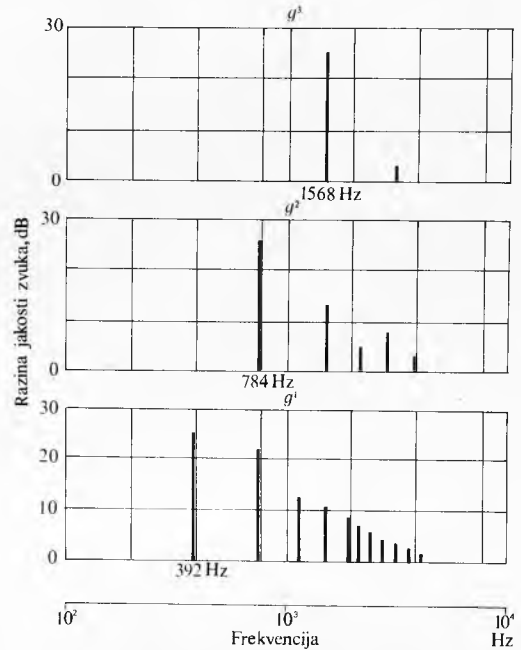
Glazbala s usnikom. Orguljska svirala predstavnik je duhačkih glazbala u kojima se glazbeni ton proizvodi titranjem zračnog stupca u cijevi. Na sl. 21. prikazani su spektri različitih tipova svirala s osnovnim tonom c^1 frekvencije ~ 262 Hz za registre diapason principal, violu, salicional i zatvorenu flautu. Registri tih glazbala izvedbe su otvorenih svirala koje se međusobno razlikuju po obliku i otvoru ustiju. U spektru



Sl. 21. Spektri istog tona različitih tipova orguljskih svirala

su sadržane parne i neparne više harmonijske frekvencije. Oblik svirale i oblik završnog otvora utječu na frekvencijsku karakteristiku zračenja i na harmonijsku strukturu. Spekter registra flaute (zatvorena svirala, sl. 21) sadrži osnovni ton, neparne više harmonijske frekvencije i veoma slabe parne harmonijske frekvencije, što je i karakteristično za zatvorenu sviralu. Ostali spektri na slici odnose se na registar principal.

Flauta je instrument siromašan višim harmonijskim frekvencijama, pa osnovni ton sadrži pretežni dio zvučne energije (sl. 22). Niži tonovi bogatiji su višim harmonijskim frekvencijama. Na višim tonovima harmonijske frekvencije praktički nestaju, a zvuk je čist i jasan. Ton flaute se gotovo približava sinusnom obliku.

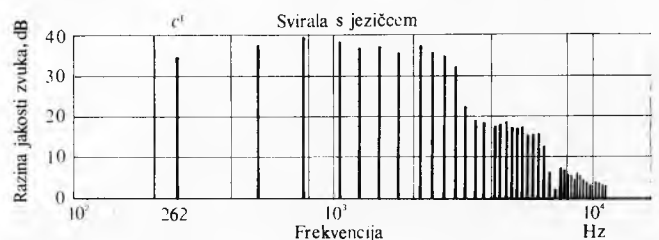


Sl. 22. Spektri triju tonova flaute

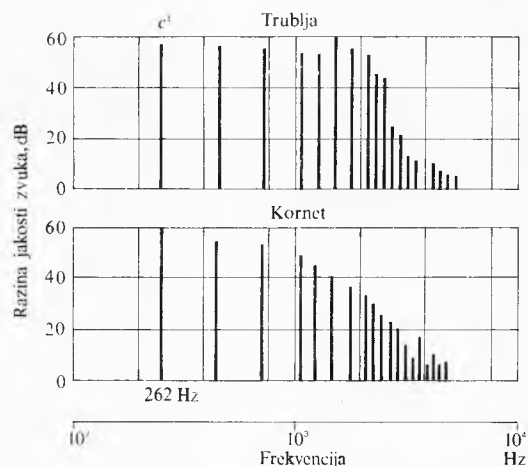
Glazbala s jezičcem. Orguljska svirala s jezičcem predstavnik je glazbala u kojima se ton proizvodi mehaničkim jezičcem pobuđivanim zrakom. Ton je bogat višim harmonijskim frekvencijama velikih amplituda, koje sve dopiru do ultrazvučnog područja. Velik je intenzitet tonova viših harmonijskih frekvencija. Pojavu viših harmonijskih frekvencija uzrokuje nelinearnost u prijenosnoj karakteristici jezičac—zračna struja, pa se tako stvaraju pilasti oblici koji sadrže sve više harmonijske frekvencije (sl. 23). Zvučni spekter dviju različitih orguljskih svirala s jezičcem vidi se na sl. 24.

Zvučni spekter *harmonike* (sl. 25) sadrži parne i neparne više harmonijske frekvencije i proteže se u ultrazvučno područje. Nadvalovi su veoma jaki.

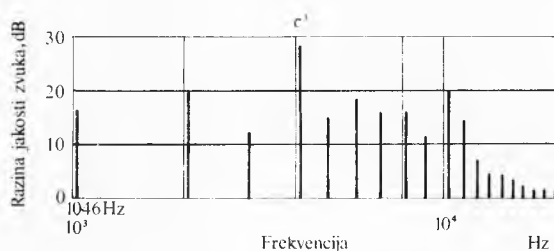
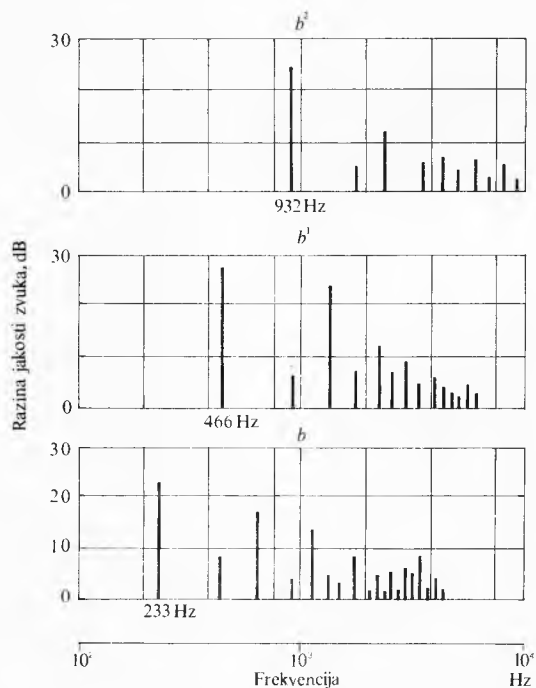
Klarinet je glazbalo s jednim mehaničkim piskom od trske povezanim s valjkastom cijevi koja se širi na kraju u obliku lijevka. Zvučni spektri triju tonova klarineta (sl. 26) sadrže parne i neparne više harmonijske frekvencije, a osnovni ton ima najveću amplitudu. To mu daje čist i svijetao zvuk. Parne više harmonijske frekvencije slabijeg su intenziteta, što je karakteristika cilindrične svirale zatvorene na jednom kraju.



Sl. 23. Spekter tona c^1 orguljske svirale s jezičcem



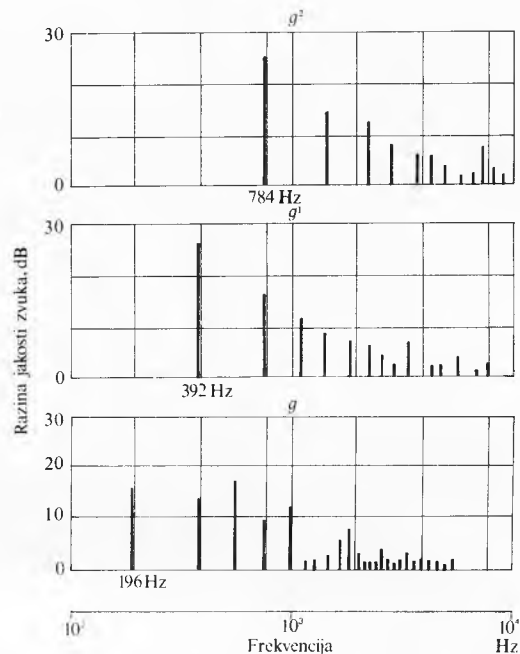
Sl. 24. Spektri istog tona dviju različitih orguljskih svirala s jezičcem

Sl. 25. Spektar tona c^3 harmonike

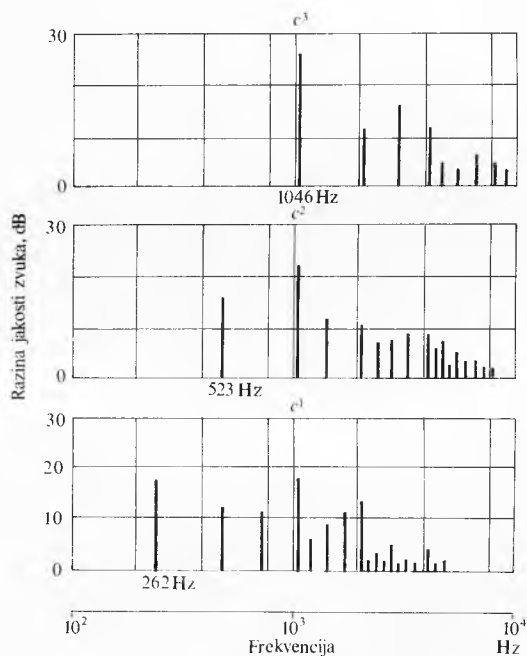
Sl. 26. Spektri triju tonova klarineta

Saksofon je glazbalo s piskom koji ima jedan jezičac, a povezan je s konusnom cijevi s proširenim otvorom. Znatna je energija sadržana u višim harmonijskim frekvencijama, i postoje velike razlike u spektrima pojedinih tonova (sl. 27). Ton saksofona ima karakteristike limenih i drvenih duhačkih glazbala. Ton im je dosta jak i pun.

Oboa je glazbalo s piskom koji ima dva jezičca, a povezan je s konusnom sviralom s ljevkastim završetkom. Veći dio zvučne energije sadržan je u osnovnom tonu i višim harmo-



Sl. 27. Spektri triju tonova alt-saksofona

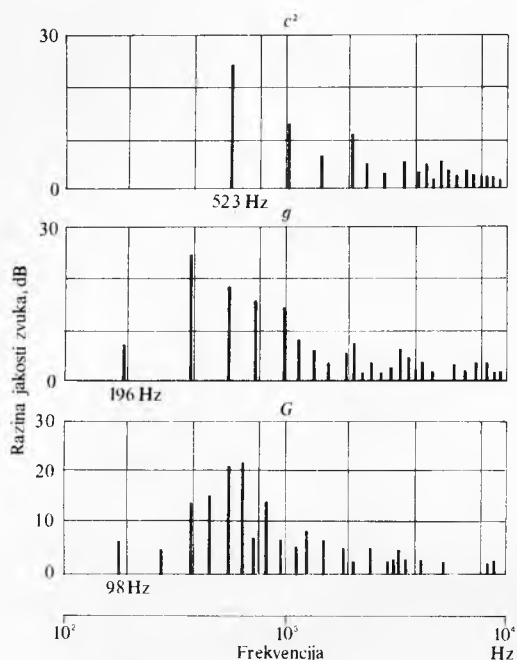


Sl. 28. Spektri triju tonova oboe

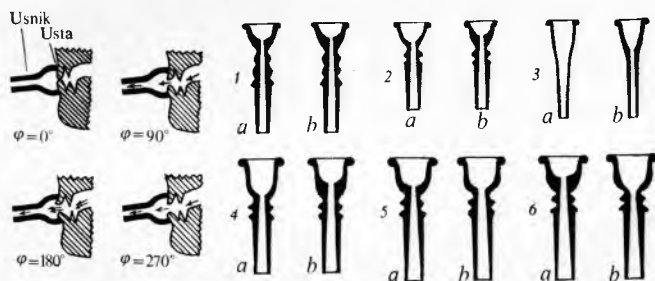
nijskim frekvencijama od 500–1500 Hz (sl. 28). Ton oboe je jasan i oštar, na što utječe dvostruki pisak.

Fagot je također glazbalo s dvostrukim jezičcem koji je povezan s konusnom sviralom. U niskim položajima osnovni ton i njemu bliže više harmonijske frekvencije malog su intenziteta (sl. 29). Istaknuto je frekvencijsko područje oko 500 Hz. Ton se odlikuje posebnom bojom.

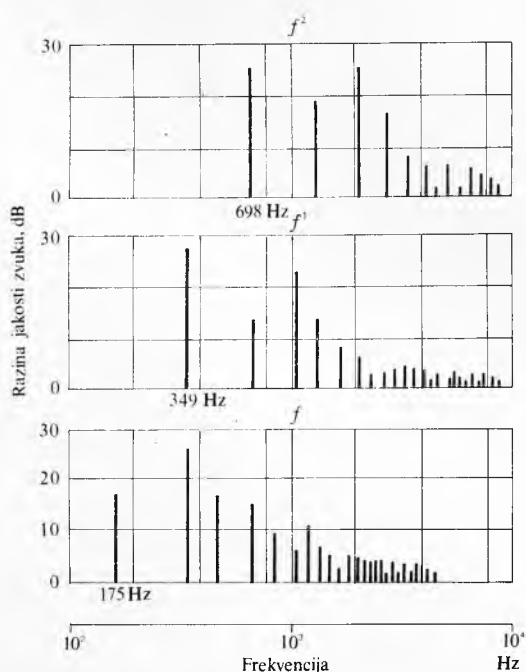
Limena duhačka glazbala. *Trublja* se sastoji od usnika oblika čašice (sl. 30) spojenog sa savinutom limenom trubom koja završava zvonolikim otvorom. Titranje usnica pretvara strujanje zraka iz pluća svirača u pulsirajuću struju. Frekvencijska je karakteristika pilastog oblika, pa je zvučni spektar bogat višim harmonijskim frekvencijama u cijelom tonskom području (sl. 31). Trublja je izražajno glazbalo s jasnim i briljantnim tonom, koji može biti mekan i rezak, već prema načinu sviranja.



Sl. 29. Spektri triju tonova fagota



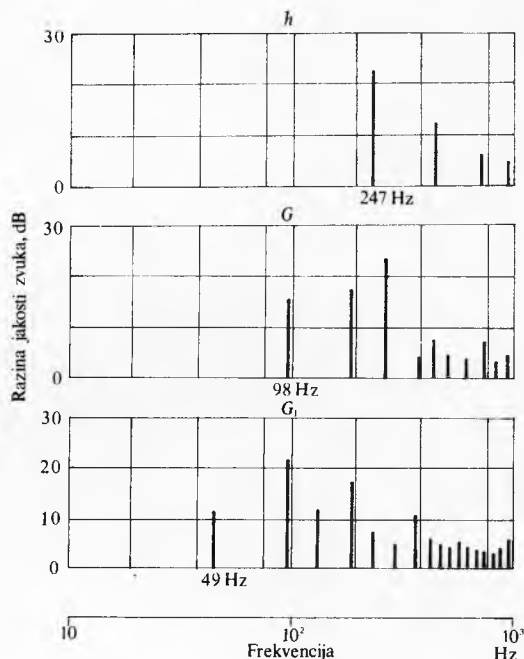
Sl. 30. Prikaz cijele periode titranja zračne struje u usniku što je uzrokuje usnice svirača. Strelice označuju jakost zračne struje. Desno su presjeci usnika duhačkih glazbala: 1 roga, 2 alt-korneta, tenor-roga, bariton-roga i tube, 3-6 trombona (za dobivanje različitog zvuka)



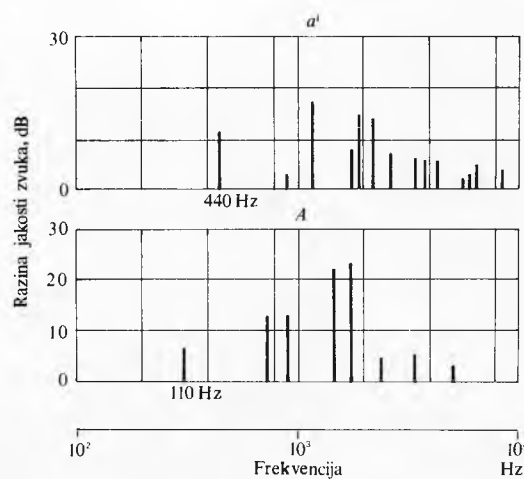
Sl. 31. Spektri triju tonova trublje

Tuba je najveće limeno duhačko glazbalo s najdubljom tonom koji se dobiva titranjem usnica svirača. Najjače su izražene komponente u području između 100-300 Hz (sl. 32).

Udaraljke su glazbala kojima se zvuk proizvodi tako da se udaraju batićima, štapovima ili jednim dijelom udaraljke o drugi.



Sl. 32. Spektri triju tonova tube

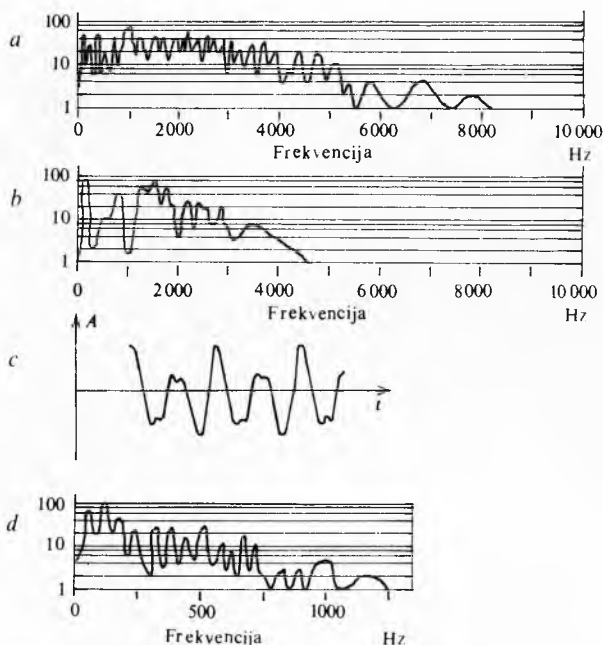


Sl. 33. Spektri tonova dvaju zvona

Zvono je udaraljka s određenom visinom tona. Nakon udarca bata u zvono zvučni se spektar vremenski mijenja. Pojedini dijelovi spektra iščezavaju nakon vrlo kratkog vremena, a pojavljuju se nove komponente koje se nisu javljale u početku (sl. 33). To nastaje zbog promjene načina titranja. Nadvalovi nisu više harmonijske frekvencije osnovnog tona. To je i razlog da je zvuk zvona, kad služi kao glazbalo, disharmonijski.

Čineli ili *plitice* su instrument s nedefiniranom visinom tona. Zvučni spektar je nepravilan i proteže se u ultrazvučno područje (sl. 34a i b), a viši tonovi nisu harmonijske frekvencije. Čineli su ritmičko glazbalo s jakim komponentama u visokofrekvencijskom području.

Timpani su najglasniji instrument u simfonijskom orkestru. Izvedeni su od bakrenog ili mjednog tijela (kotla) u obliku polukugle, na koji je napeta magareća ili teleća koža obručem na kojemu se nalaze vijci za ugađanje. Amplituda zvučnog



Sl. 34. Spektri tonova udaraljki, a i b zvučni spektar činela, c amplituda zvučnog vala timpanā, d zvučni spektar timpanā

vala timpana vidi se na sl. 34c, a spektar timpana na sl. 34d. Nadvalovi nisu više harmonijske frekvencije osnovnog tona.

Usmjerne karakteristike klasičnih glazbala. Violina je složen titrajni sustav, a takva joj je i usmjerna karakteristika. Usmjerna karakteristika violine u ravni okomitoj na žice prikazana je za pojedine frekvencije na sl. 35. Pri nižim frekvencijama slična je osmičastoj karakteristici, što pokazuje da je sustav akustički dipol i da donja i gornja ploha tijela titraju skoro istofazno. To uvjetuje i konstrukcija glazbala, naime obje su plohe spojene s pomoću dušice (stupića), što osigurava njihovu međusobnu vezu pri nižim frekvencijama. Na srednjim frekvencijama pojavljuje se fazna razlika između gornje i donje plohe, a također i fazne razlike na ploham, što se očituje i u usmjernoj karakteristici kod tih frekvencija. U području viših frekvencija zrači uglavnom samo gornja ploha, jer je na tim frekvencijama slaba veza preko dušice između gornje i donje plohe zbog njezine relativno velike mase.

Viola, violončelo i kontrabas imaju slične usmjerne karakteristike kao violina, ali se frekvencije pomiču prema nižem području i ovise o dimenzijama glazbala.

Usmjerne karakteristike glasovira u ravni žica pri različitim frekvencijama uz otvoren poklopac vide se na sl. 35. Na nižim frekvencijama karakteristika je kružna. U području srednjih i viših frekvencija poklopac se ponaša kao reflektor zvuka što ga zrače žice i tijelo glazbala. Zbog toga je pojačano zračenje u smjeru djelovanja reflektora. Položaj reflektora važan je na koncertima i za vrijeme snimanja, a ovisi o vrsti glazbe i načinu sviranja. Ako je izvedba solistička poklopac je potpuno otvoren, a ako glasovir služi kao pratnja, poklopac je manje otvoren.

Usmjerne karakteristike klarineta u horizontalnoj ravni vide se na sl. 35. Zbog malog otvora lijevka klarinet nema znatnije usmjerenje sve do visokih frekvencija. Male uske latice na usmjernoj karakteristici nastaju zbog zračenja rupa na glazbalu i nisu prikazane na dijagramima.

Usmjerne karakteristike sopran-saksofona slične su karakteristikama klarineta, ali su zbog većeg otvora pomaknute prema nižim frekvencijama (sl. 35). Nešto su drugačije za alt-saksofon koji se sastoji od limene savinute cijevi što se konusno širi i ima zvonoliki završetak. Zbog toga je karakteristika za visoke frekvencije vrlo uska. Nesimetrični položaj karakteristike prema referentnoj osi nestaje zbog savinutog otvora glazbala.

Oboa, engleski rog i fagot ne pokazuju bitne razlike u usmjernim karakteristikama od karakteristika klarineta zbog sličnih otvora.

Otvori flaute i male flaute maleni su s obzirom na valnu duljinu sve do vrlo visokih frekvencija. Zato je usmjerna karakteristika, koja je posljedica zračenja otvora, praktički kružna sve do 10 000 Hz. Znatno zračenje pojavljuje se iz otvora instrumenta u koji se puše, a manje kroz rupe. Dakle, budući da se radi o sustavima s više zvučnih izvora, usmjerna karakteristika ima mnogo latica, ali im je uglavnom prosječna karakteristika neusmjerena.

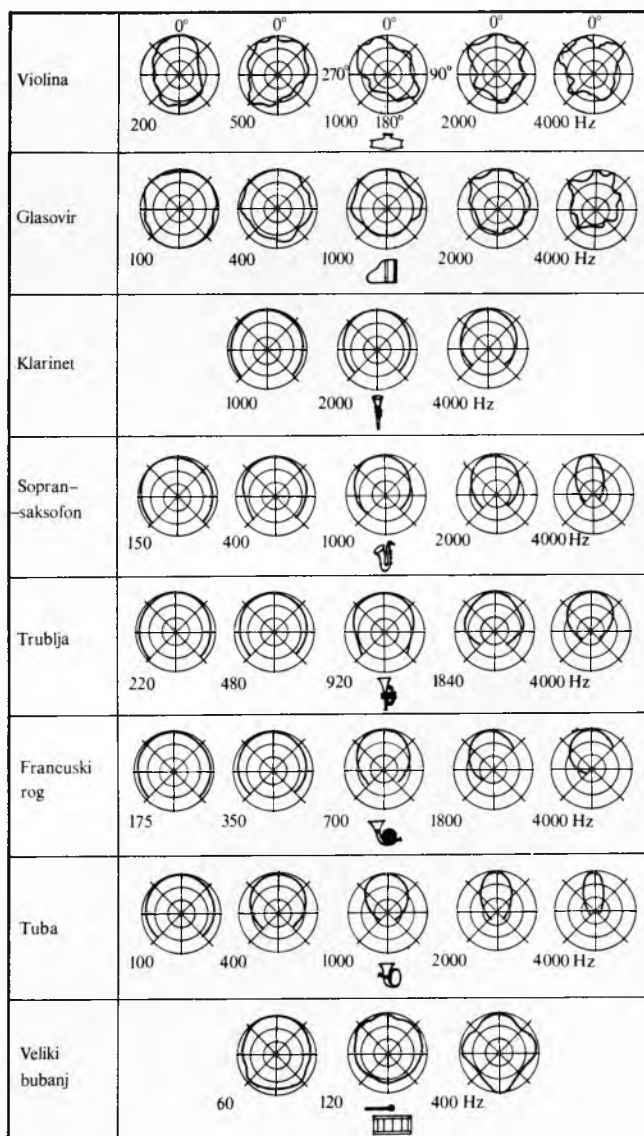
Usmjerne karakteristike trublje (sl. 35) suzuju se prema visokim frekvencijama. Budući da trublja zrači samo iz otvora, usmjerna je karakteristika vrlo glatka, bez dodatnih latica. Unutar kuta od 90° oko osi maksimalnog zračenja intenzitet je praktički neovisan o frekvenciji sve do 4000 Hz.

Usmjerne karakteristike korneta slične su karakteristikama trublje, jer su im slične dimenzije i oblici otvora.

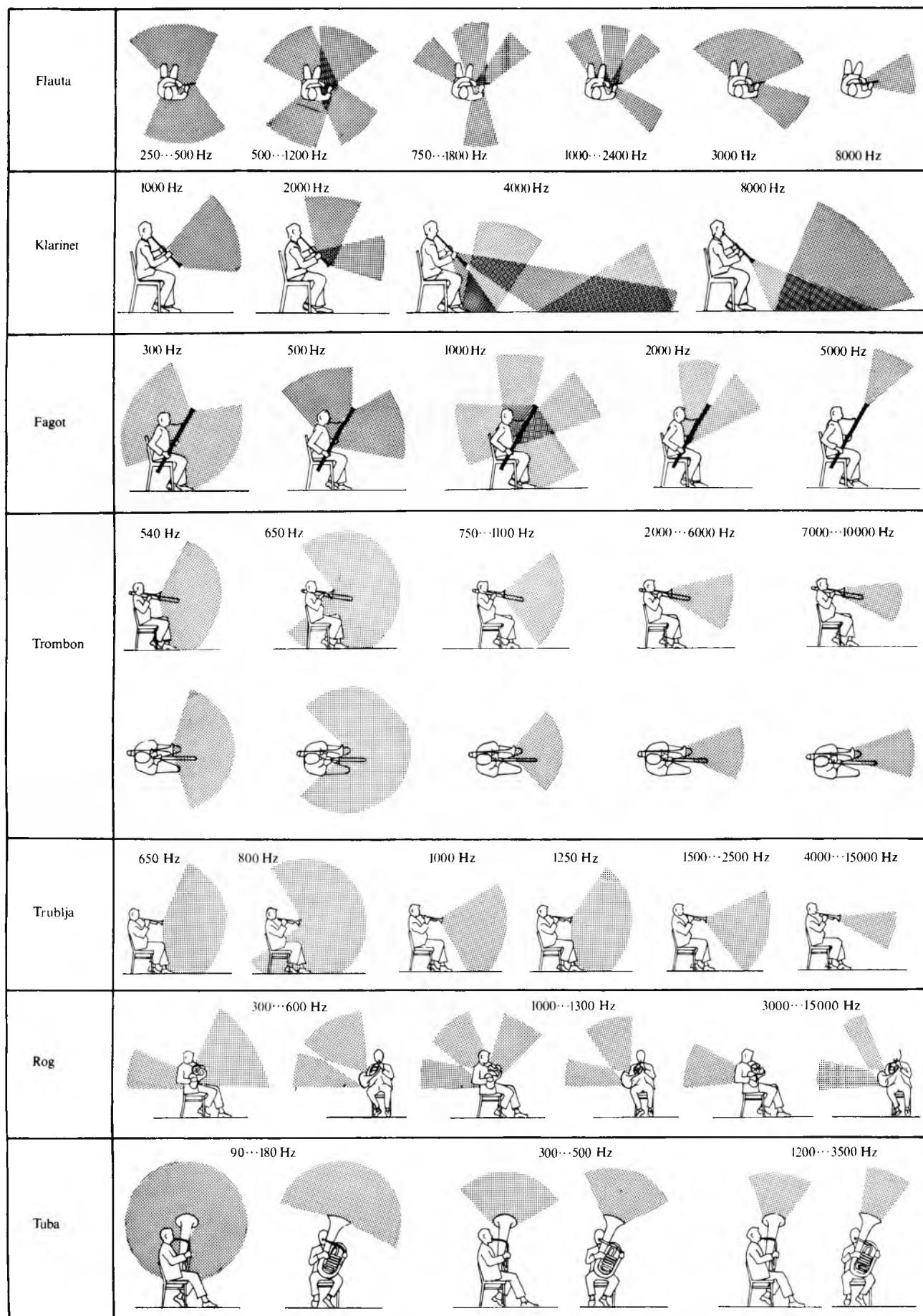
Usmjerne karakteristike trombona slične su karakteristikama trublje, a frekvencije su pomaknute prema nižim frekvencijama, već prema omjeru dimenzija ljevkastih otvora.

Usmjerne karakteristike francuskog roga (sl. 35) slične su karakteristikama trublje, ali su zbog većeg otvora pomaknute prema nižim frekvencijama.

Tuba je savinuta konusna limena cijev koja završava zvonolikim otvorom. Promjer cijevi na mjestu gdje se širi u zvono relativno je velik; o njemu ovisi usmjerna karakteristika na višim frekvencijama. U tom području usmjerna karakteristika je sasvim uska (sl. 35).



Sl. 35. Usmjerne karakteristike nekih glazbala. Kružnice u dijagramu znače slabljenje od 10, 20 i 30 dB

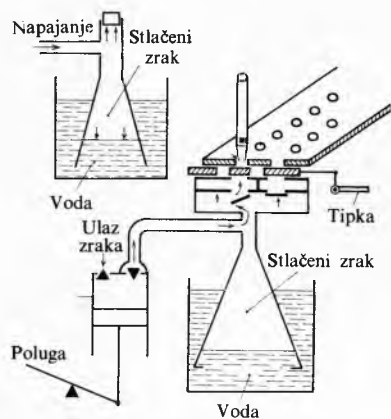


Sl. 36. Slikovit prikaz usmjernih karakteristika nekih glazbala. Prikazano je prostorno područje u kojemu zvuk oslabi do 30 dB prema najjačem

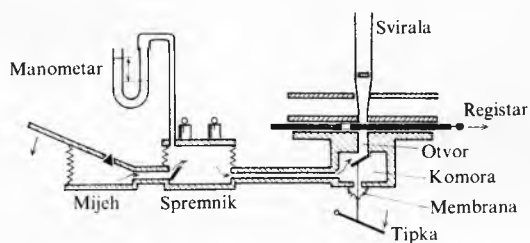
Bubanj je dvostrani odašiljač, pa njegove karakteristike ovise o dimenzijama, udaljenosti i fazi titranja membrana. Zbog toga se pojavljuju latice na usmjernoj karakteristici (sl. 35). Usmjerne karakteristike ostalih bubnjeva slične su karakteristici velikog bubnja, samo su im frekvencije obrnuto razmjerne dimenzijama glazbala.

Realne usmjerne karakteristike nekih glazbala, u ravninama i orijentacijama karakterističnim za položaj izvodača i glazbala, prikazane su na sl. 36.

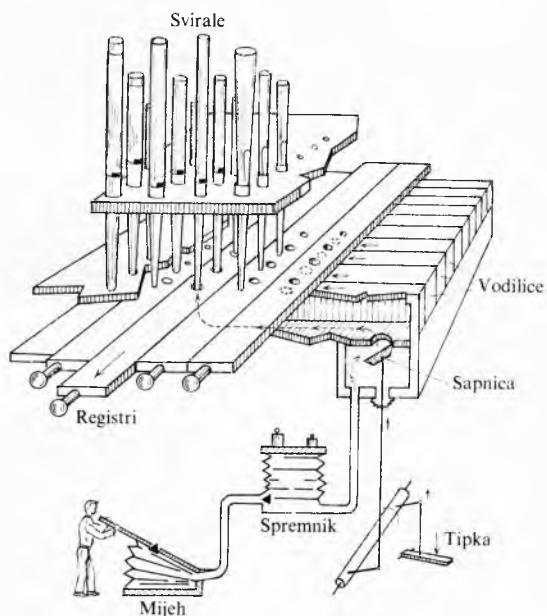
Orgulje su složeno glazbalo u kojemu se pomoću mnogo različitih svirala mogu proizvoditi zvuci različitih boja. Orgulje imaju posebnu, njima svojstvenu boju zvuka, a slaganjem raznih svirala i načina njihovog pobuđivanja oponašaju se boje zvuka mnogih duhačkih glazbala.



Sl. 37. Shematski prikaz starinskih hidrauličnih orgulja



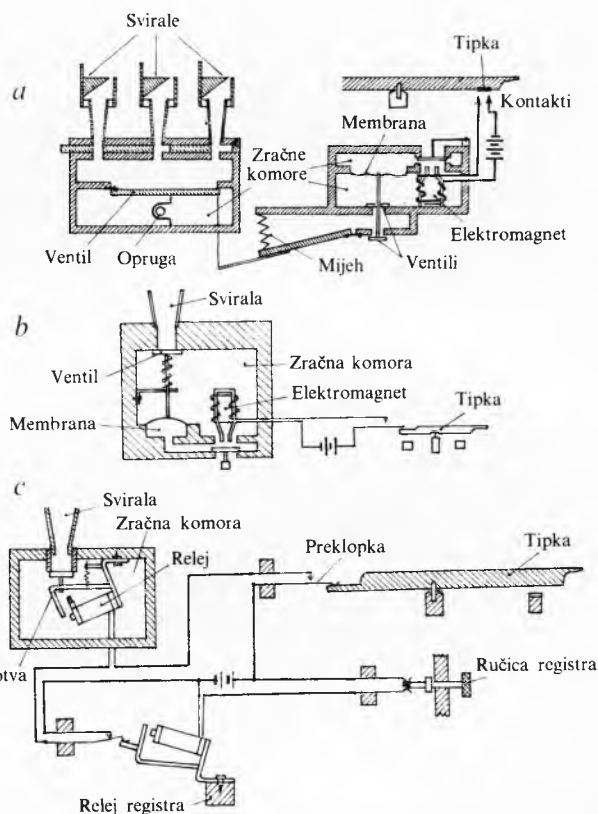
Sl. 38. Vođenje komprimiranog zraka do svirale u starinskim mehaničkim orguljama



Sl. 39. Odabiranje različitih svirala pomoću tipki, pedala i registara u starinskim mehaničkim orguljama

Orgulje se sastoje od tri osnovna sustava: *sustava svirala* (s mnogo različitih svirala), *pobudnog zračnog sustava* (mjehovi, zračni kanali, sapnice), te *sviraonika* (klavijatura — manuali i pedali) s trakturom (registri, kopule).

Svirale orgulja pobuđuju se zračnom strujom iz spremnišne zračnice u kojoj se stalni tlak zraka održava kompresorom (sl. 37, 38 i 39). Upravljanje orguljama može biti mehaničko, pneumatsko, elektropneumatsko, elektromagnetsko i elektroničko (sl. 40). U suvremenim orguljama upotrebljavaju se elektronički sklopovi za memoriranje, sklopovi digitalne elektronike, elektroničke sklopke itd. Takve su orgulje konstruktivno jednostavnije, na njima se lakše svira, njima se lakše upravlja, te se stvaraju novi zvučni efekti ili dopunjuju postojeći.



Sl. 40. Shematski prikaz triju načina upravljanja orguljskim ventilima pomoću električnih releja. a) elektropneumatsko djelovanje, b) elektropneumatsko s pločastim ventilom i membranom za jednu sviralu, c) elektroničko djelovanje

Raspored registara s kopolama na manuale i pedal zove se *dispozicija*. Za orgulje je karakteristično da pritiskom na tipku ne zazvuči samo osnovni ton kao kod glasovira, već se također mogu čuti za oktavu, kvintu ili tercu viši ili niži tonovi kao homogeni ton karakteristične boje. Visina tona nekog registra označuje se stoga duljinom najdulje svirale C, i to je osnovni ton registra, prema kojem se registar i zove (tabl. 4).

Otvorena svirala kojoj je tonska visina C (65,39 Hz) duga je 8 stopa, odnosno 2,4384 m, pa se registar označuje sa 8'. Za oktavu niži registar označuje se sa 16', za dvije oktave niži 32', za kvintu viši 5 1/3', za oktavu viši sa 4', itd. Te se oznake upotrebljavaju i za elektroničke orgulje.

Manje orgulje do 600 svirala imaju oko 10 registara, srednje oko 30, a velike sa 4000 svirala imaju i oko 70 registara. Danas se grade orgulje i s više od 12000 svirala, i više od 70 registara.

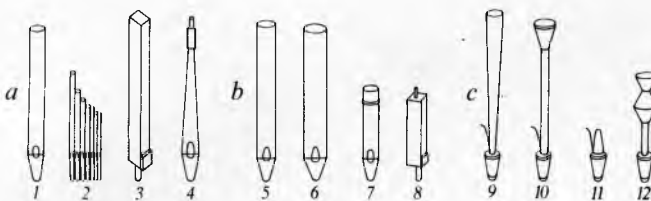
Kombinacijom različitih vrsta svirala, zatvorenih i otvorenih, dobiju se tonovi slični pojedinim klasičnim glazbalima (sl. 41) i prema tome se nazivaju registri.

Treba naglasiti da su orgulje glazbalo koje zahtijeva poseban akustički ambijent, što traži usklađenje glazbala i prostora.

Tablica 4

DISPOZICIJA ORGULJA U KONCERTNOJ DVORANI »VATROSLAV LISINSKI« U ZAGREBU

Prvi manual	Drugi manual	Treći manual	Četvrti manual	Setzer	Pedal
Principal 16'	Pommer 16'	Hornprincipal 8'	Gedeckt 8'	Gen. Setzer 1, 2, 3, 4	Untersatz 32'
Gedeckt 16'	Principal 8'	Salicional 8'	Quintatön 8'	Tutti	Principalbass 16'
Diapason 8'	Gamba 8'	Schwebung 8'	Viola 8'	Crecs. ab	Subbass 16'
Gemshorn 8'	Gedeckt 8'	Traversflöte 8'	Principal 4'	get. Ped 5, 6, 7	Gedeckt bass 16'
Rohrflöte 8'	Octav 4'	Ital. Principal 4'	Flöte 4'	Tutti aus	Octavbass 8'
Grossnasard 5 1/2'	Spitzflöte 4'	Salicet 4'	Quintflöte 2 3/4'	Ausl.	Flötenbass 8'
Octav 4'	Blockflöte 2'	Offenflöte 4'	Octav 2'	HR. ab	Nachthorn 4'
Nachthorn 4'	Sesquialter 2f	Waldflöte 2'	Terz 1 1/2'		Choralbass 4'
Quinte 2 3/4'	Cornet 5f	Hasard 2 3/4'	Larigot 1 1/4'		Choralbass 2'
Superoctav 2'	Oberton 4f	Mixtur 3f	Siffelöte 1'		Mixtur 5f
Mixtur 6—8 f	Krummhorn 8'	Oboe 8'	Zymbel 3f		Bombarde 32'
Scharf 4—6 f	Schalmey 4'	Trompete 8'	Vox humana 8'		Posaune 16'
Fagot 16'	Tremolo	Clarion 4'	Dulzian 8'		Trompete 8'
Trompete 8'	IV/II	IV/III	Tremolo		Clarion 4'
Super III/I	III/II				Super III/Pedal
Sub III/I					IV/Pedal
IV/I					III/Pedal
III/I					II/Pedal
II/I					I/Pedal



Sl. 41. Svirale različitih orguljskih registara, a svirale s usnom: 1 principal, 2 miksura, 3 drveni principal, 4 konusna trubljića; b poprečno smještene svirale: 5 ptičja ili poljska flauta, 6 noćni rog, 7 metalna flauta, 8 zatvorena drvena flauta; c svirale s jezičcima: 9 trombon, 10 oboa, 11 harfa, 12 fagot

Orgulje kao glazbalo zahtijevaju velik volumen prostora i relativno dugi odjek. To, međutim, nije u svakom prostoru moguće a ni poželjno, npr. kad takvi prostori imaju i druge namjene (koncertne dvorane). Zbog toga se uvode sustavi za postizanje dužeg trajanja odjeka (ambiofonija), odnosno neki drugi električni i elektroakustički sklopovi i sustavi koji se upotrebljavaju za procesiranje glazbenog signala i u električnim glazbenim instrumentima.

ELEKTRONIČKA GLAZBALA

Elektroničkim glazbalima proizvodi se zvuk koji može biti sličan zvuku klasičnih glazbala, ali i takav koji stvara potpuno drugačiju, novu zvučnu sliku.

Stari glazbeni automatski mehanizmi stvarali su tonove pomoću titranja štapova, žica, membrana i svirala. Do kraja XIX st. pogonski mehanizmi uglavnom su bili jednostavniji, npr. opruge, a kasnije su ih zamijenili elektromotori. To su bili uređaji različitih dimenzija i različitih oblika, od veličine džepnog sata, glazbenih kutija, do velikih glazbenih ormara (orkestrioni).

Željena melodija dobivala se pomoću programiranih valjaka sa žljebovima, odnosno šiljcima, ili bušenih šablona od ljepeke ili lima koje su se puštale kroz mehanizam.

Osim tih samosvirajućih glazbala niz stoljeća upotrebljavana su mehanička glazbala na ručni pogon, tzv. *vergli* (tal. *vergula orguljice*). Mali i veliki vergli sa žicama imali su ili kratki manual, ili valjke sa žljebovima, odnosno šiljcima. Vergli sa sviralama pobuđivani su ručno, a pogonski mehanizam istodobno je punio miješ.

Potkraj XIX st. fonograf i gramofon istinili su automate i vergle.

Otkrića H. L. F. Helmholtza, J. W. S. Rayleigha i drugih fizičara o zakonima akustike nisu dugo našla svoju praktičku primjenu. Izumom elektronske cijevi A. Fleminga i L. de Foresta to se područje počelo naglo razvijati, a osobito nakon izuma tranzistora i razvoja poluvodičke elektronike. Razvojem elektroakustike i električne tehnologije, koja je omogućila izradbu integriranih sklopova visokog stupnja integracije, te računarske tehnike to se područje sve više razvija. Ono je omogućilo razvoj novih studijskih uređaja i razvoj visokokvalitetnih, tzv. uređaja HiFi za reprodukciju, prijamnika, pojačala, pretpojačala, gramofona, magnetofona, kasetofona, zvučnih sustava, slušalice itd.

Pronađeni su novi postupci snimanja zvuka (više kanalno snimanje), konstruirani su uređaji za izvođenje različitih efekata, a i mnoga nova električna glazbala kojima se zamjenjuju klasična glazbala. Nadalje, proizvedena su

potpuno nova glazbala koja proizvode sasvim drugačiju zvučnu sliku nego dotadašnja (sintetizator, vokoder) u kojima se, osim analogne tehnike, primjenjuje i digitalna tehnika. Posljedica toga jesu i nova glazba, konkretna glazba, električna glazba, te različiti zvučni efekti.

Razvojem elektroakustike, a osobito razvojem visokokvalitetne tzv. HiFi tehnike, glazba se preselila iz koncertnih dvorana, kazališta, crkava i zabavišta skoro u svaki stan.

Interes za akustiku i elektroakustiku povezan je s pojavom novih glazbala, novih načina skladanja i snimanja, upotrebom novih glazbenih ljestvica i novih zvučnih efekata. Tako su se razvila nova slušna sredstva za koja praktički ne postoje fizikalna ograničenja. Dakle, dobivena su nova glazbala koja su omogućila i nastanak nove glazbe.

F. Busoni (1906) u djelu *Osnovi glazbene estetike* naglasio je da zapravo glazbalo ograničuje razvoj glazbe. Promatrajući klasična mehanička glazbala uočavaju se mnogi njihovi nedostaci. Neka glazbala proizvode tonove u veoma uskom tonskom opsegu, druga imaju preslabe ili preake tonove, ili pak zahtijevaju od glazbenika veoma veliku spretnost, mnogi tonovi prenaporno prestatu itd.

U glazbenoj povijesti pojavila su se do 1900. god. dva električna glazbala, godine 1861. Delabardovo *električno čembalo* (clavier électrique), a 1876. *elektroharmonijski glasovir* (E. Gray). T. Cahil sastavio je 1906. god. orijaški *dinamofon* ili *telharmonij* (masa 200 t). Budući da još nisu bili poznati zvučnici, rijetki koncerti Cahilove električne glazbe slušali su se preko telefonskih slušalica.

Godine 1920. u Lenjingradu prikazao je S. Theremin *eterofon*. Osam godina kasnije S. Theremin je patentirao svoj pronalazak u Americi i u suradnji sa H. Cowellom nastalo je svjetlosno električno glazbalo *ritmikron*. U to su doba u Americi nastale i prve skladbe za novo glazbalo (J. Schilling, Cowell). Nakon drugoga svjetskog rata nastalo je više skladbi (E. Varese, B. Martini itd.). Na osnovi tog glazbala nastaju i druga slična (električna čarobna violina, elektrondo, sferofon itd.).

Na drugačijem su području radili od 1917. francuski radio-tehničari, a 1928. M. Martenot konstruirao je električno glazbalo *ondes musicales*, ili *Ondes Martenot*, tzv. Martenotovi valovi. I za to glazbalo skladaju se nove skladbe.

Godine 1928. Nijemci B. Hellberge i P. Lertes izrađuju *helertion*, koji se nakon dotjerivanja proizvodio industrijski. Godine 1930. orguljaš F. Trautwein izveo je polifono glazbalo *trautonij* koji se i dalje razvijao, a skladatelj P. Hindemith skladao je za taj instrument.

Usporedo s navedenim, električnim i električnim glazbalima, razvijaju se također orgulje bez svirala na osnovi Cahilove ideje. Godine 1916. V. de Bill izrađuje fotoelektrične orgulje, a 1923. u Londonu prikazane su električne orgulje. Godine 1932. u Parizu su izgrađene električne trombanalne orgulje sa 400 generatora, 76 registara i pedalom sa 32 tipke. Godinu dana kasnije u Berlinu su izgrađene električne orgulje sa 91 generatorom. Godine 1934. L. Hammond u Chicagu na osnovi Cahilove ideje izrađuje elektroakustičke orgulje sa 91 profilnim kotačem, dva manuala sa 132 tipke, pedalom sa 32 tipke i 23 registra. Godine 1936. E. Weltey izrađuje slične fotoelektrične orgulje.

Tridesetih godina ovog stoljeća pojavili su se različiti uređaji koji električnim sredstvima povezuju mehanička glazbala (violina, violončelo, gitara, električni glasovir).

Pojavom tranzistora, integriranih sklopova, naglim razvojem digitalne tehnike i računarske tehnologije stvorene su neslućene mogućnosti razvoja glazbala i sustava koji daju i sasvim drugačiju zvučnu sliku nego klasična glazbala (sintetizator, vokoder itd.).

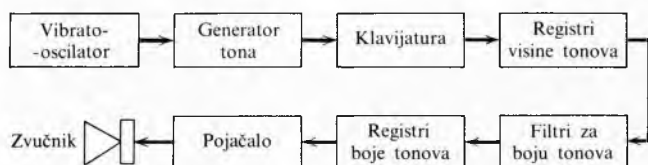
Elektroničko proizvođenje zvuka

Svaka akustička veličina ima zamjenu u elektrotehnici. *Visina tona* odgovara frekvenciji napona ili struje, *glasnoća* amplitudi, a *boja* spektru titraja dobivenog Fourierovom analizom. Metode mjerenja i upravljanja tim električnim veličinama vrlo su prikladne. Sviranjem na klasičnom glazbalo izvođač izvodi neki ton subjektivno. Taj ton nije uvijek točno određenog intenziteta

i visine, jer ovisi o elementima kao što su potez gudala, duhanje, položaj prstiju i ruke, i sl. Međutim, dobivanje zvuka elektroničkim generatorima točno je određeno.

Muzičari vježbaju godinama kako bi postigli ugodan zvuk u umjerenom dinamičkom području (violina), dok najjednostavniji električni atenuatori mijenjaju intenzitet zvuka bez utjecaja na druge njegove karakteristike.

Boja muzičkog tona ovisi o amplitudama nadvalova, a ne o njihovoj fazi. Mnogo je lakše postići ton određene boje, nego li određenog valnog oblika. Konsonantnost je određena višekratnim odnosom frekvencija pojedinih viših harmonijskih frekvencija. Takav odnos postoji u akordu i u glazbenim skalama. Svako se elektroničko glazbalo, s manjim odstupanjima, sastoji od sljedećih dijelova: sustava generatora za dobivanje tona, klavijature, kontrole glasnoće, dijela za dobivanje boje tona, dijela za dobivanje tremola i vibrata, dijela za dobivanje efekata, te sustava pojačala i zvučnika (sl. 42).



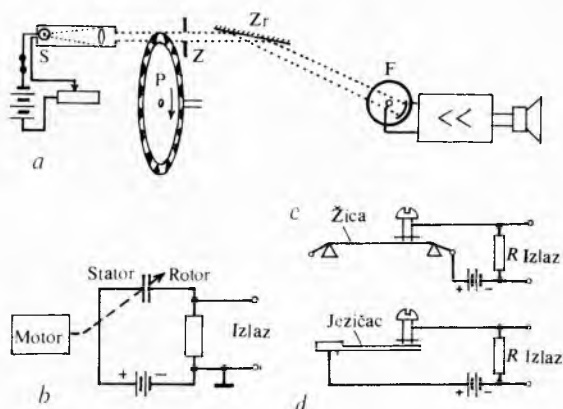
Sl. 42. Blok-shema elektroničkog muzičkog instrumenta

Dobivanje tona. Generatori frekvencija najvažniji su dijelovi elektroničkih glazbala. Razvoj generatora, počevši od Hammondovih generatora (1935) pa do današnjih digitalnih, tekao je vrlo brzo. Pri tom su sve više zadovoljavani zahtjevi točne frekvencije, valnog oblika, ugađanja, postizanja različitih efekata itd.

Prema načinu stvaranja tona mogu se elektronička glazbala svrstati u dvije skupine: *glazbala s elektromehaničkim generatorima* i *glazbala s elektroničkim generatorima*.

Elektromehanički generatori jesu elektromagnetski, elektrodinamički, elektrostatski, piezoelektrični, fotoelektrični i elektroakustički. U većini tih generatora proizvodi se ton utjecajem rotirajućih ploča, titrajućih žica ili jezičaca na elektromagnetsko, odnosno elektrostatsko polje.

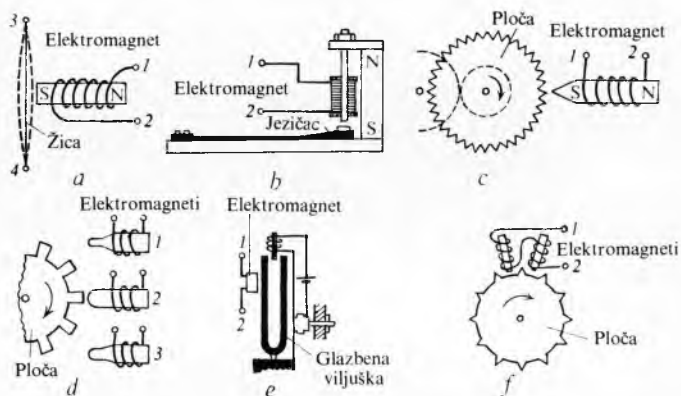
Fotoelektrični način dobivanja tona srodan je dobivanju zvuka na filmu. Svakom tonu pripada okrugla staklena ili metalna ploča koja se okreće stalnom brzinom. Na toj ploči nalaze se zasjenjenja ili rupe, a o njihovu rasporedu ovisi visina tona i valni oblik (sl. 43a). *Elektrostatski generator* sastoji se od kondenzatora kojemu se kapacitet mijenja promjenom položaja ploča (sl. 43b). Okretanjem rotora mijenja se kapacitet kondenzatora. Struja nabijanja i izbijanja stvara na otporniku željeni valni oblik napona, koji se dalje pojačava, a ovisan je o obliku ploča, dok je frekvencija ovisna o broju okretaja rotora. U



Sl. 43. Tonski generatori. a) fotoelektrični generator (S svjetiljka, P nazubljena ploča, Z zaslon, Zr zrcalo, F fotoelektrični element, npr. fotočelija), b) principijelna shema rotirajućeg elektrostatskog generatora, c i d) principijelna shema vibrirajućeg elektrostatskog generatora

titrajnim sustavima promjena kapaciteta dobiva se titranjem žice (sl. 43c) ili jezičca (sl. 44d). Posljedica toga je izmjenični napon na otporniku.

Od elektromehaničkih sustava *elektromagnetski način* se najviše primjenjivao, osobito za elektroničke orgulje (sl. 44). To se primjenjuje i danas u električnim glazbalima: električna gitara, električni bas, električni glasovir itd. Vrlo je interesantan elektromagnetski način kojeg je primijenio L. Hammond 1935. godine. U blizini magnetskog štapa, koji ima na kraju zavojnicu, rotira nazubljena čelična ploča (sl. 44c). Pri okretanju ona se približuje ili udaljuje od magnetskog štapa, pa se zbog promjene udaljenosti mijenja jakost magnetskog polja i ta promjena inducira napon u zavojnici. Valni oblik napona i frekvencija ovisni su o broju i obliku zubaca, te o broju okretaja čelične tonske ploče.



Sl. 44. Elektromagnetski tonski generatori: a) s napetom žicom, b) s jezičcem, c) s rotirajućom nazubljenu ploču, d) s rotirajućom nazubljenu ploču s različitim oblicima elektromagneta, e) s glazbenom viljuškom, f) s rotirajućom nazubljenu ploču s serijskim elektromagnetima koji djeluju kao filtri

Elektromehanički generatori nisu se održali i pored svojih odlika, kao npr. točnosti, ne samo zbog potrebnog prostora, nego i zbog loše tonske kvalitete, neekonomičnosti, teško ostvarivih pogodnih oblika ovojnice (osobito vremena porasta). Nedostatak je tih sustava i teškoća pri dobivanju vibrata, tremola, portamenta, transpozicije, ugađanja i drugih efekata.

Elektronička glazbala u užem smislu riječi rade danas s *elektroničkim generatorima tona*. Za starija glazbala upotrebljavani su oscilatori s elektronskim cijevima (Meissnerov, Hartleyjev, Colpittsov, oscilator s negativnim otporom, Huth-Kühnov oscilator, RC-generator, treptajni generator, multivibrator itd.) i oscilatori s ionskim cijevima (tinjalica, tiratron). Kasnije su tranzistori u oscilatorima zamijenili elektronske i ionske cijevi. Razvitkom poluvodičke tehnologije diskretna je izvedba zamijenjena u mnogim slučajevima monolitnom integriranom izvedbom, pa se danas gotovo jedino upotrebljavaju generatori s posebno izvedenim integriranim sklopovima za glazbala.

Prema tome koliko se tonova može istodobno proizvesti, elektronička su glazbala *jednoglasona* ili *monofona* (gdje se istodobno može svirati samo jedan ton) i *višeglasna* ili *polifona* (gdje se istodobno može svirati više tonova).

Višeglasna glazbala sadržavala su u početku mnogo generatora, barem po jedan za svaki ton, dok se kod jednoglasonih može raditi samo s jednim generatorom.

Zamjerke elektroničkim generatorima s obzirom na mnogobrojnost elemenata za postizanje potrebne točnosti frekvencije nisu više praktičnog značenja, jer su ti elementi razvitkom integriranih sklopova znatno pojeftinili.

Za višeglasna glazbala maksimalno dozvoljena relativna pogreška ugađanja ne smije biti veća od jednog centa.

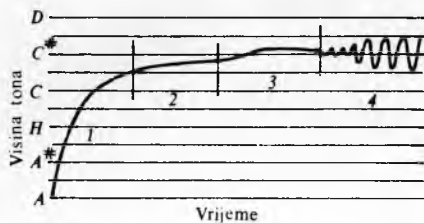
U početku višeglasnost je postignuta s po jednim oscilatorom konstantne frekvencije za svaki ton, odnosno svaku tipku. Npr. za glazbalo od 8 oktava trebalo je 96 oscilatora. Taj je način ubrzo odbačen zbog mnogo oscilatora, i zbog frekvencijske nestabilnosti pojedinih oscilatora, što bi proizvelo neprihvatljivo velike relativne pogreške i tražilo prečesta ugađanja.

Najjednostavniji modeli elektroničkih orgulja imaju manje oscilatora, a jedan oscilator služi za više tonova i daje ton samo one frekvencije za koju je tipka pritisnuta. Tu se, dakle, ne radi o višeglasnom glazbalu u pravom smislu riječi a za neke akorde manjkaju pojedini tonovi.

Izbor generatora ovisi općenito o načinu dobivanja tona, izboru klavijature i vrsti glazbala. Za harmonijsku sintezu najčešće se upotrebljavaju sinusni generatori, a za izdvajanje željenih nadvalova generatori složenog valnog oblika.

Jednoglasna glazbala. U standardnim jednoglasnim glazbalima kao što su čelo, violina ili klarinet, izvođač može odabirati tri parametra: visinu tona, glasnoću, a manje boju. Dobivanje kontinuiranog tona mnogo je važnije u tim glazbalima nego u višeglasnima. U nekim se jednoglasnim glazbalima kontinuirana promjena visine postiže sasvim lako, a u višeglasnima (npr. orgulje) ona je neizvediva.

Grafički prikaz visine tona kao funkcije vremena (sl. 45) prikazuje izvođenje tona na solo-glazbalima. U dijelu 1 izveden je portamento. Jakost tona, koja nije označena, postupno raste sve do trenutka kada je dostignuta potrebna visina tona. Tako izveden ton djeluje ljepše nego kad bi bio započet na istoj visini. Ton koji počinje ispod svoje frekvencije (dio 2) slušatelj osjeti kao kretanje. U trećem području izveden je ton određene visine, a u četvrtom dodan je tonu postupni vibrato.



Sl. 45. Dijagram visine tona prema vremenu pokazuje postepeno postizanje visine određenog tona na jednoglasnom glazbalu. 1, 2, 3 i 4 su područja različitih karakteristika tona

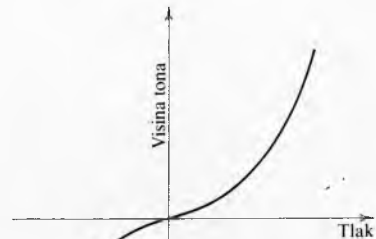
Zahtjevi koji se postavljaju jednoglasnim glazbalima određuju i vrstu generatora podesnih za upotrebu. Pri tom izboru najvažniji su sljedeći faktori: frekventijska stabilnost u duljem vremenskom razdoblju, oblik signala koji omogućuje različite varijacije boje u cijelom frekventijskom području i potreba da se jednim generatorom obuhvati što širi frekventijski pojas.

Za proizvodnju tona jednoglasnih glazbala najčešće se upotrebljava generator s pozitivnom reakcijom (sl. 46), ali postoje i druge izvedbe tog spoja. Pogodnim izborom pojedinih elemenata može se takvim sklopom postići relativno dobra frekventijska stabilnost. Promjenom otpornika R_3 o kojem ovisi oblik signala, može se dobiti približno pilast signal bogat višim harmonijskim frekvencijama.

Bolji rezultati, ali na užem frekventijskom području, postižu se RC-generatorom gdje frekventijska stabilnost zadovoljava čak i pri upotrebi standardnih otpornika i kondenzatora.

Osim toga upotrebljavaju se i treptajni oscilatori. Sumirajući dva visokofrekventijska titraja na emitorskom otporniku

dobiva se sinusni audiosignal, nepodesan za primjenu u glazbalu. Unatoč tome, kao i uz izobličenje koje treba izvesti u sljedećem stupnju, te teško postizanje frekventijske stabilnosti (upotrebom kristala), ipak je izvedba tog generatora važna. Takav generator omogućuje dobivanje kontinuiranog tona i jednostavnije sprečavanje udara pri nastajanju tona. Kapacitet kondenzatora u titrajnom krugu mijenja se pomoću specijalnih klavijatura, npr. djelovanjem horizontalne sile na tipku o kojoj ovisi visina tona (sl. 47), jer se time dobiva kontinuirana promjena frekvencije. U glazbalima s većim opsegom upotrebljavaju se djelitelji frekvencije.



Sl. 47. Ovisnost visine tona o tlaku kojim se djeluje na tipku

Višeglasna glazbala. Svaki ton ljestvice takvih glazbala treba da je proizveden posebnim generatorom s točno određenom visinom tona koja se ne mijenja tokom vremena i s promjenom temperature. Isto tako mora imati dobru karakteristiku uključivanja i isključivanja tona, tako da se pri tome ne čuje udar. Potrebno je dobiti različite valne oblike da bi se postigle i različite boje (registri), te da bi se izvodili vibrato i tremolo.

Iako je i u jednoglasnim glazbalima potrebna velika stabilnost frekvencije zbog mogućnosti naknadnog usklađivanja, ipak ta stabilnost nije toliko važna kao u višeglasnima, gdje je naknadno usklađivanje gotovo neizvedljivo. Zbog toga su najprije bila izrađena glazbala s rotirajućim generatorima u kojima tonska ploča stoji u čvrstom frekventijskom odnosu tako da se ne može pojaviti neusklađenost.

Elektronički generatori. Elektronički generatori u suvremenim elektroničkim orguljama mogu se razvrstati u dvije osnovne skupine: sustav dvanaest neovisnih oscilatora i digitalni sustavi.

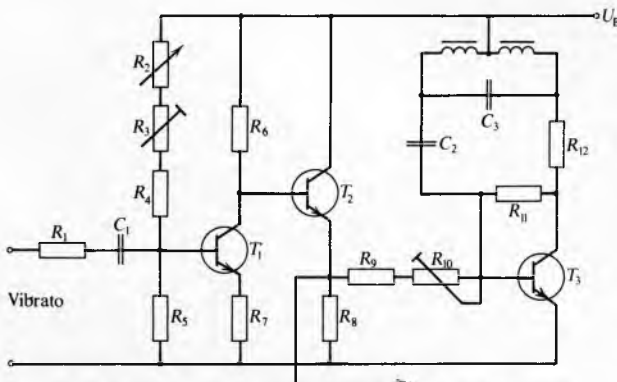
Sustav dvanaest neovisnih oscilatora može se izvesti zahvaljujući svojstvima glazbenih ljestvica gdje se pojedini tonovi nalaze u oktavnim odnosima.

Generator tonova sastoji se od dvanaest neovisnih oscilatora ugođenih prema temperiranoj glazbenoj ljestvici koji daju dvanaest tonova najviše oktave.

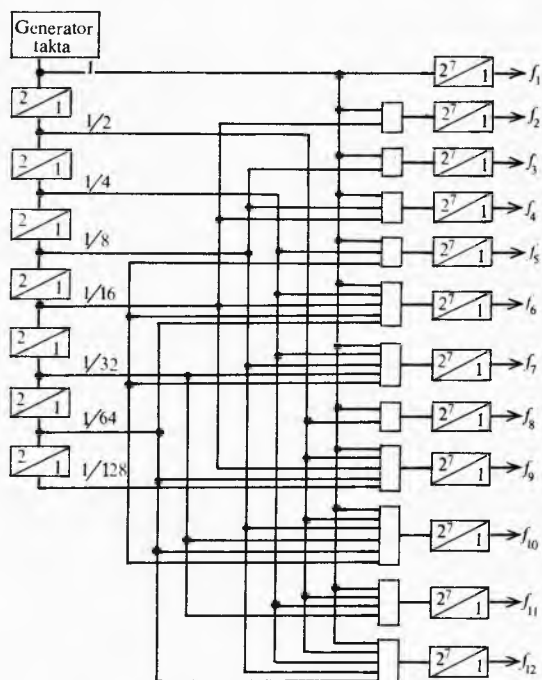
Ti se tonovi zatim uzastopno dijele sa dva, te se tako dobivaju tonovi svih ostalih nižih oktava (sl. 48). Najbliža niža oktava dobije se dijeljenjem gornjih frekvencija sa dva, i to se dijeljenje nastavlja sve dok se ne postigne cijeli tonski opseg. Svi tako dobiveni tonovi međusobno su sinhronizirani. Relativno i apsolutno odstupanje dvanaest osnovnih tonova mora biti dovoljno maleno. Relativno odstupanje treba da bude to manje, što je veće tonsko područje instrumenata. Ako se za dobivanje boje tona primjenjuje harmonijska sinteza, mogu se, zbog neusklađenosti osnovnog tona i nadvalova, te neusklađenosti susjednih tonova, stvoriti neželjene kombinacije tonova.

Sinhronizacija ima, međutim, i neke nedostatke. Budući da svi oktavni generatori rade u fazi, eliminiran je efekt akorda, a broj generatora, koji bi sinhronizirani sinusnim valom mogli omogućiti dobivanje tog akorda, vrlo je malen.

Stariji je način stabiliziranja frekvencije sinhronizacijom pomoću elektronske cijevi koja radi kao glavni sinhroni oscilator ugođen prema najvišoj oktavnoj frekvenciji. Iza glavnog oscila-



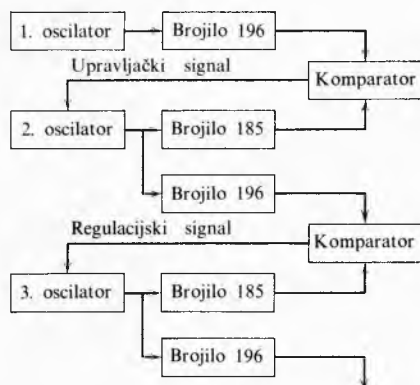
Sl. 46. Glavni tonski oscilator s temperaturnom stabilizacijom



Sl. 48. Blok-shema generatora tonova osnovne oktave principom frekvencijske sinteze, koji se sastoji od dvanaest neovisnih oscilatora ugođenih prema temperiranoj ljestvici najviše oktave

tora slijede frekvencijski djelitelji koji rade kao bloking-oscilatori i stvaraju pilasti signal.

Fazno zatvorena petlja. U suvremenoj tehnici sinhronizacija 12 neovisnih oscilatora izvodi se tzv. načinom PLL (engl. phase-locked-loop, sl. 49). Omjer frekvencija dvaju susjednih polutonova temperirane ljestvice jest $\sqrt[12]{2}$. Ta vrijednost napisana razlomkom iznosi 196/185, s pogreškom $3 \cdot 10^{-6}$. Načinom PLL svaka dva oscilatora su na određen način vezana. Brojila postavljena na 196, odnosno 185, odbrojavaju titraje. Ako je postignuto da pri istodobnom početku oba brojila imaju isto vrijeme odbrojavanja, omjer je frekvencija obaju oscilatora 196/185. Ako to ne nastupi istodobno, tada se stvara regulacijski signal P_u kojim se jedan od oscilatora dodatno ugodi. Tako je povezano dvanaest glavnih oscilatora.

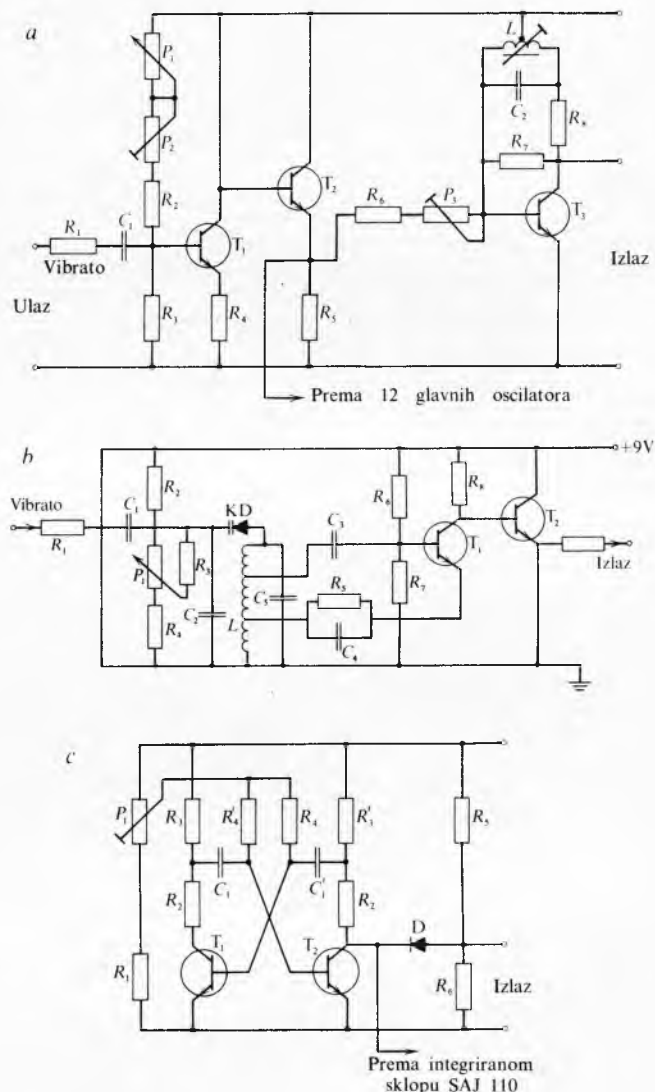


Sl. 49. Sinhronizacija frekvencije principom fazno zatvorene petlje

U tranzistorskoj tehnici kao glavni oscilator, obično se upotrebljava Hartleyjev oscilator na koji se ujedno dovodi i signal za vibrato (sl. 50a). Frekvencija oscilatora može se mijenjati u određenim granicama strujom baze. Utjecaj promjene temperature na parametre oscilatornog stupnja kompenziran je sklopom koji je zajednički za svih 12 oscilatora. Taj sklop ujedno

pojačava i vibrato napon koji se privodi bazi tranzistora T_1 kojim se može mijenjati frekvencija oscilatora za ± 1 poluton. Stabilnost frekvencije tog sklopa vrlo je dobra i zadovoljava uz stabiliziran napon napajanja u temperaturnom području $0 \dots 60^\circ \text{C}$.

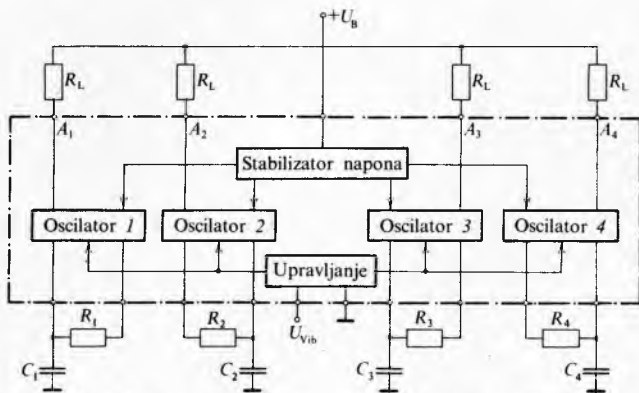
Veoma često se upotrebljavaju i spojevi glavnih oscilatora s kapacitivnim diodama gdje se kapacitet mijenja s naponom, pa su vrlo pogodni za dobivanje vibrata (sl. 50b).



Sl. 50. Spojevi glavnih oscilatora. a) Hartleyjev oscilator s bipolarnim tranzistorom, b) oscilator s kapacitivnom diodom KD, c) astabilni multivibrator s bipolarnim tranzistorima

U jednostavnijim glazbalima kao glavni oscilator najčešće se upotrebljavaju astabilni multivibratori (sl. 50c). Prednost je tih sklopova u tome što je izbjegnuta zavojnica i što oni daju pravokutan oblik. Međutim, stabilnost frekvencije manja je nego kod LC-oscilatora, a temperaturna je ovisnost mnogo veća. Promjenom samo jednog elementa RC-sklopa može se postići promjena frekvencije samo unutar jedne oktave.

Iako se još uvijek u elektroničkim glazbalima upotrebljavaju oscilatori s diskretnim komponentama, sve se više pojavljuju integrirani sklopovi koji su posebno konstruirani za elektroničke orgulje. Npr. jedan od njih je monolitni integrirani sklop TC 430-N koji sadrži četiri oscilatora (sl. 51). Prema tome, sa tri takva integrirana sklopa može se dobiti svih dvanaest tonova gornje oktave. I tada, kao i u multivibratoru, izlazni je signal pravokutnog oblika i dovoljno velik za pobuđivanje djelitelja. Sklop je veoma stabilan i pogodan je za primjenu vibrata.



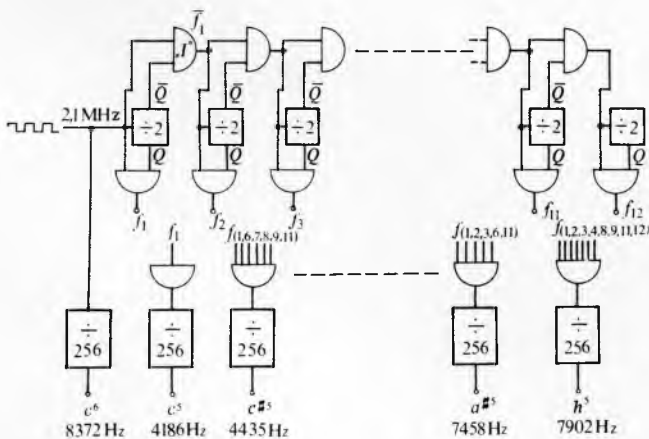
Sl. 51. Blok-shema integriranog sklopa koji je generator dvanaest tonova

Digitalna proizvodnja tona. Razvitkom poluvodičke MOS-LSI tehnologije može se primijeniti jedan od digitalnih postupaka za dobivanje tona kojima se uklanjaju mnogi nedostaci. Zbog visokog stupnja integracije prihvatljiva je i cijena takvih uređaja.

Osnovno je za sve digitalne postupke da se tonske frekvencije dobivaju iz jednog oscilatora frekvencije 1...10 MHz, tako da se zbog promjene frekvencije mijenja visina tona cijelog glazbala. Ta promjena može biti malena, npr., radi ugađanja prema drugim instrumentima, a može iznositi jedan ili više polutonova, tako da se lako može svirati određena skladba u drugom tonalitету bez transponiranja. Ako se ipak promijeni frekvencija oscilatora, relativna ugođenost je dobra i glazbalo samo za sebe neće zvučati neharmonijski. Nadalje, osigurana je jednaka dubina vibrata unutar cijele oktave, a omogućeno je i izvođenje glisanda. Danas se primjenjuju sljedeći osnovni postupci za digitalno dobivanje glazbenih tonova gornje oktave:

frekvencijska sinteza, sustav dvanaestog korijena iz dva ($\sqrt[12]{2}$), neovisni djelitelji i djelitelji u alternirajućem redu.

Frekvencijska sinteza. Sustav za frekvencijsku sintezu sastoji se od glavnog oscilatora, bistabilnih multivibratora, I-vrata, ILI-vrata i djelitelja frekvencija (sl. 52). Broj bistabila izravno utječe na točnost frekvencije gornje oktave.



Sl. 52. Principijelna shema dobivanja tonova frekvencijskom sintezom

Pravokutni signali iz glavnog oscilatora dolaze na I-vrata, na koja dolazi i signal iz bistabila, ali s polovicom frekvencije. Izlazi Q i $\bar{Q}$ svakog od dvanaest bistabilnih multivibratora spojeni su na ulaz sljedećeg bistabila preko dvojnih I-vrata. Budući da postoje dvojna vrata, na jedna dolazi izlaz Q bistabila, a na druga invertirani izlaz $\bar{Q}$; na izlazu I-vrata dobivaju se dva pravokutna signala iste širine impulsa, fazno pomaknuta za 180° i s polovicom frekvencije od ulazne. Ti su signali prikazani na sl. 52 i označeni su kao f_1 i $\bar{f}_1$. Izlazi Q po-
buđuju sljedeće bistabile s frekvencijom f_1 , dakle isto kao i

signal glavnog oscilatora f , dok se na izlazima Q dobiva frekvencija od f_1 do f_{12} . Frekvencije koje pripadaju pojedinim mjestima u dvanaestoznamenastom binarnom broju prikazane su u tabl. 5. Tako na izlazu Q nastaju signali sa dva osnovna svojstva: svaka frekvencija iznosi polovicu od prethodne, a ni jedna od dvanaest frekvencija ne koincidira s drugima u bilo kojem vremenskom intervalu. Tako dobiveni signali dovode se na ILI-vrata u različitim kombinacijama između f_1 i f_{12} (prema tome koji je binarni broj pridijeljen tonu gornje oktave) gdje se zbrajaju, a zbroj se tih frekvencija podijeli sa 256 (tabl. 6). Npr., ton e^5 (5274,04 Hz) dobiva se pomoću frekvencija f_1, f_3, f_8, f_{10} i f_{12} . Nakon dijeljenja zbroja tih frekvencija iz ILI-vrata sa 256 dobiva se ton e^5 frekvencije 5275,42 Hz, dakle približne onoj iz tabl. 5. Najveća relativna pogreška iznosi 0,45 centa. Vrijednost pogreške određena je brojem bistabila. Za 11 bistabila iznosi 1,1 centa.

Frekvencija glavnog oscilatora određena je najvišim tonom gornje oktave ($c^6 = 8372$ Hz) i djeliteljem (256) te iznosi $\sim 2,14$ MHz.

Tablica 5
FREKVENCije KOJE PRIPADAJU BINARNIM BROJEVIMA

Redni Broj	Binarni broj	Pripadna frekvencija Hz
f_1	100 000 000 000	1071617,0
f_2	010 000 000 000	535808,6
f_3	001 000 000 000	267904,3
f_4	000 100 000 000	133952,1
f_5	000 010 000 000	66976,0
f_6	000 001 000 000	33488,0
f_7	000 000 100 000	16744,0
f_8	000 000 010 000	8372,0
f_9	000 000 001 000	4186,0
f_{10}	000 000 000 100	2093,0
f_{11}	000 000 000 010	1046,5
f_{12}	000 000 000 001	523,2

Tablica 6
FREKVENCije TONOVA JEDNE OKTAVE IZRAŽENE BINARNIM BROJEM

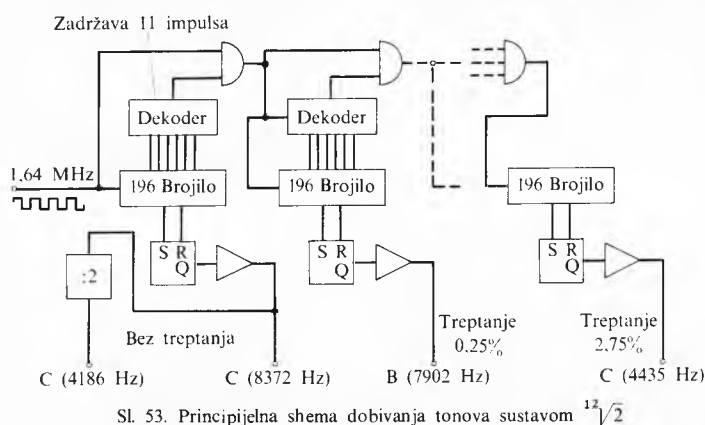
Ton	Standardizirana frekvencija f_0 Hz	Binarna aproksimacija sa 12 znamenaka	Pripadna frekvencija f_b Hz	Odstupanje $f_b - f_0$ Hz
c^5	4186,00	100 000 000 000	4186,00	0,00
$c^{\#5}$	4434,92	100 001 111 010	4431,28	-3,64
d^5	4698,64	100 011 111 011	4699,03	0,39
$d^{\#5}$	4978,03	100 110 000 100	4998,59	20,56
e^5	5274,04	101 000 010 101	5275,42	1,38
$e^{\#5}$	5587,65	101 010 101 110	5588,15	0,50
$f^{\#5}$	5919,91	101 101 010 001	5940,85	20,94
g^5	6271,93	101 111 111 101	6292,40	20,47
$g^{\#5}$	6644,87	110 010 110 011	6644,87	0,01
a^5	7040,00	110 101 110 101	7041,40	1,40
b^5	7458,62	111 001 000 010	7460,41	1,78
h^5	7902,13	111 100 011 011	7903,94	1,81

Zbog ispadanja impulsa pri određivanju tona valni je oblik na izlazu ILI-vrata nepravilan. Ta nepravilnost, nazvana *treptanje* (engl. jitter), zapravo je treptajni šum koji se javlja u višim oktavama. Dijeljenjem sa 256 treptanje se smanjuje, ali je još znatno.

Viša frekvencija glavnog oscilatora omogućuje dijeljenje s većim brojem, što još više smanjuje tu neželjenu pojavu. Međutim, ta je frekvencija danas ograničena ograničenom brzinom impulsnih sklopova. Treptaji se mogu ukloniti pomoću uskopojasnih filtara za svaki ton. Uz skuplju i kompliciraniju izvedbu onemogućeno je pomicanje frekvencije, te dobivanje vibrata i portamenta.

Sustav dvanaestog korijena iz dva ($\sqrt[12]{2}$). Omjer frekvencija dvaju susjednih polutonova temperirane ljestvice iznosi $\sqrt[12]{2}$.

Razlomak 196/185 približava se ovoj vrijednosti s pogreškom $3 \cdot 10^{-6}$. Taj sustav osniva se upravo na tom svojstvu temperirane glazbene ljestvice. Sustav se sastoji od dvanaest jednakih stupnjeva u kojima se svaka ulazna frekvencija dijeli razlomkom 196/185 (sl. 53). Ulazna frekvencija, tj. frekvencija glavnog oscilatora napaja digitalno brojilo koje pobuđuje RS-bistabil, tako da nakon svakih 196 impulsa daje samo jedan pravokutni impuls. Taj je signal jedan od dvanaest tonova najviše oktave. Drugi dio svakog stupnja sastoji se od dekodera koji potiskuje 11 impulsa iz svakih 196 ulaznih, a preostalih 185 šalje u sljedeći stupanj, te u I-vrata. Tako drugi stupanj prima 185 impulsa za svakih 196 impulsa prvog stupnja. Dakle, omjer je ulazne i izlazne frekvencije svakog stupnja $196/185 \approx \sqrt[12]{2}$.



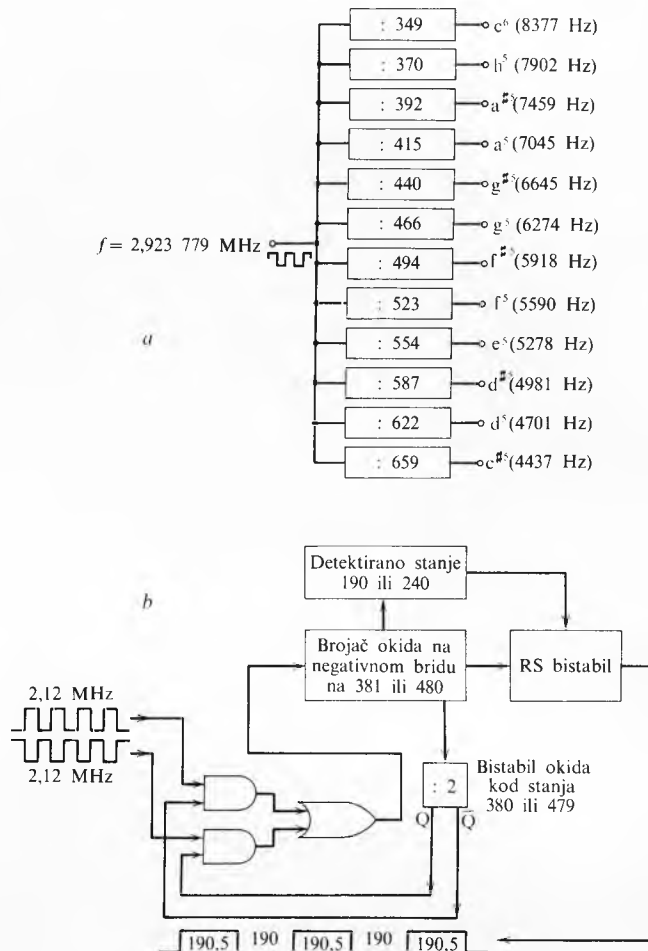
Sl. 53. Principijelna shema dobivanja tonova sustavom $\sqrt[12]{2}$

Frekvencija je glavnog oscilatora $8372 \times 196 = 1,64$ MHz. Točnost sustava ovisi o približenju razlomka vrijednosti $\sqrt[12]{2}$ i uz omjer 196/185 iznosi 0,077 centa. Iako su jeftiniji sustavi koji rade s razlomkom s manjim vrijednostima u brojniku i nazivniku razlomka, npr. 107/101 s pogreškom 1/1590 ili 89/84 s pogreškom 1/1500, male pogreške opisanog sustava čine omjer 196/185 prihvatljivim.

I u tom sustavu također se pojavljuje treptanje koje pobuđuje treptajni šum pri nižim tonovima. Treptanje raste sa svakim sklopom za 0,25% (sl. 53). Treptanje ovisi o načinu potiskivanja impulsa, pa ovisi o tome da li se potiskuje postupno ili odjednom. Treptaji se mogu smanjiti, kao i kod frekvencijske sinteze, tj. dijeljenjem s većim brojem, što opet traži više frekvencije glavnog oscilatora i brže sklopove.

Neovisni djelitelji. Taj se sustav sastoji od dvanaest neovisnih djelitelja kojima se dijeli frekvencija glavnog oscilatora (sl. 54a).

Ako je najveći djelitelj 349, frekvencija oscilatora iznosi $8372 \cdot 349 \approx 2,924$ MHz, a ako je za najviši ton odabran djelitelj 522, tada je 4,37 MHz. Izlaz iz svakog djelitelja daje jedan od dvanaest tonova u najvišoj oktavi. Točnost tog sustava ovisna je o izboru djelitelja s kojima se dijeli frekvencija glavnog oscilatora. Kad djelitelj raste, raste i frekvencija oscilatora, a



Sl. 54. Sustav dvanaest neovisnih djelitelja. a) principijelna shema, b) primjer dijeljenja niže frekvencije s parnim i neparnim djeliteljima

točnost je veća. Pogreška u prvom slučaju iznosi 1,6 centa, a u drugome je 1,03 centa.

U tabl. 7 nalaze se frekvencije oscilatora, različite vrijednosti djelitelja i pripadne pogreške.

Budući da je uz prihvatljivu pogrešku (1,03 centa) potrebna dosta visoka oscilatorna frekvencija (4,37 MHz), što je za današnju tehnologiju veoma mnogo, primjenjuje se sljedeći postupak. Uzima se upola niža frekvencija glavnog oscilatora, što zahtijeva i upola niže djelitelje. To je lako izvesti kad su djelitelji parni. Međutim, u tom sustavu postoje tri neparna djelitelja, pa je potrebno primijeniti sljedeću izvedbu. Upola niža ulazna frekvencija, npr. 2,12 MHz, dovodi se protufazno na ulaz I-vrata (sl. 54b). Dijeljenje frekvencije 4,25 MHz sa 959, odnosno sa 761, jednako je dijeljenju upola niže frekvencije sa 479,5, odnosno sa 380,5. Primjenom dijeljenja sa 479, odnosno 380,

Tablica 7
SUSTAV NEOVISNIH DJELITELJA

Ulazna frekvencija MHz	Djelitelji za pojedine tonove												Najveća pogreška cent
	C	H	B	A	G [#]	G	F [#]	F	E	D [#]	D	C	
1,549	185	196	208	220	233	247	262	277	294	311	330	349	3,92
1,584	189	200	212	225	238	252	267	283	300	318	337	357	3,80
1,844	220	233	247	262	277	294	311	330	349	370	392	415	3,64
1,992	238	252	267	283	300	318	337	357	378	400	424	449	3,20
1,999	239	253	268	284	301	319	338	358	379	402	426	451	2,32
2,922	349	370	392	415	440	466	494	523	554	587	622	659	1,63
3,098	370	392	415	440	466	494	523	554	587	622	659	698	1,63
3,675	439	465	493	522	553	586	621	658	697	738	782	829	1,52
4,245	507	537	569	603	639	677	717	760	805	853	903	957	1,48
4,252	508	538	570	604	640	678	718	761	806	854	905	959	1,03
5,477	654	693	734	778	824	873	925	980	1038	1100	1165	1235	0,99

T-bistabil promijeni fazu ulaza za 180° , pa se nakon pola periode RS-bistabil ponovno vraća u početno stanje preko izlaza brojača (u jedinici je bio postavljen za 240, odnosno 190 impulsa). Tako se dobio djeliteľ koji dijeli sa 479,5, odnosno sa 380,5.

Djelitelji u alternirajućem redu. Budući da je omjer frekvencija između dva polutona iracionalan broj, ne može se točno izraziti kvocijentom cijelih brojeva. Točnost ugađanja ovisi o stupnju približenja tom broju, uzimajući u obzir najvišu moguću frekvenciju glavnog oscilatora. Primjenom dviju logičkih razina, vrlo brzih CML (Current Mode Logic) i 1^2L (Integrated Injection Logic), kojima je maksimalna frekvencija do 12 MHz, može se načiniti sustav generatora tonova. Omjer frekvencija polutonova temperirane ljestvice $1:\sqrt[12]{2} = 0,9438743127$ može

se prikazati zbrojem članova alternirajućeg reda kojemu su članovi cjelobrojne negativne potencije broja dva

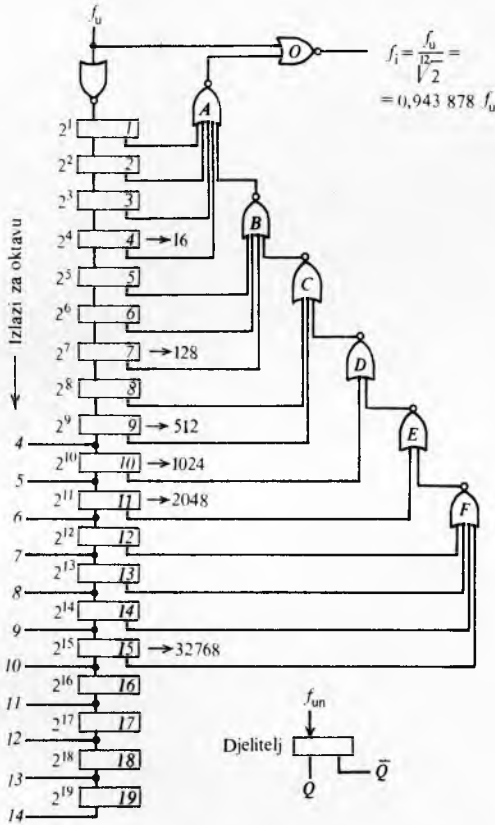
$$2^0, -2^{-4}, +2^{-7}, -2^{-9}, +2^{-10}, -2^{-11}, +2^{-15}.$$

Taj se red može ostvariti binarnim dijeljenjem, zbrajanjem i oduzimanjem pomoću logičkih sklopova.

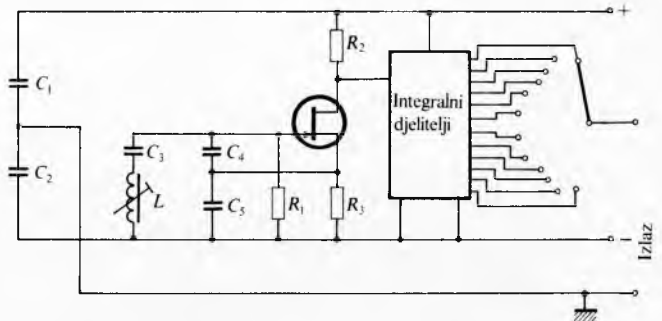
Shema logičkog integriranog sklopa prikazana je na sl. 55. Ulazna frekvencija iz glavnog oscilatora f_0 reda veličine 8-9 MHz invertira se i dovodi se na niz djeliteľja. Ulazna se frekvencija dijeli sa 2^9 , pa se tako smanjuje treptanje. Izlazi tih djeliteľja napajaju određene kombinacije krugova NILI i ILI gdje se zbraja, odnosno oduzima sve dok se ne dobije frekvencija $0,943878 f_0$, što je vrlo blizu vrijednosti $\sqrt[12]{2}$. Taj se izlaz spaja na isto takav sljedeći krug. Za realizaciju generatora koji obuhvaća 10 oktava potrebno je 12 integriranih sklopova. Točnost dobivena tim postupkom vrlo je visoka, tako da pogreška iznosi 0,0492%. Taj je način ujedno pogodan za digitalno dobivanje boje tona.

Kad se usporede opisani sustavi, vidi se da se visoka točnost može ostvariti povećanjem broja elemenata, a treptanje se može smanjiti povišenjem frekvencije glavnog oscilatora, što zahtijeva primjenu vrlo brzih logičkih sklopova, a jedno i drugo zahtijeva veće troškove. Da bi se udovoljilo zahtjevima ekonomičnosti i tehničkim potrebama s obzirom na visinu i čistoću tona, najpovoljnije je upotrijebiti sustav neovisnih djeliteľja, što predstavlja kompromisno rješenje.

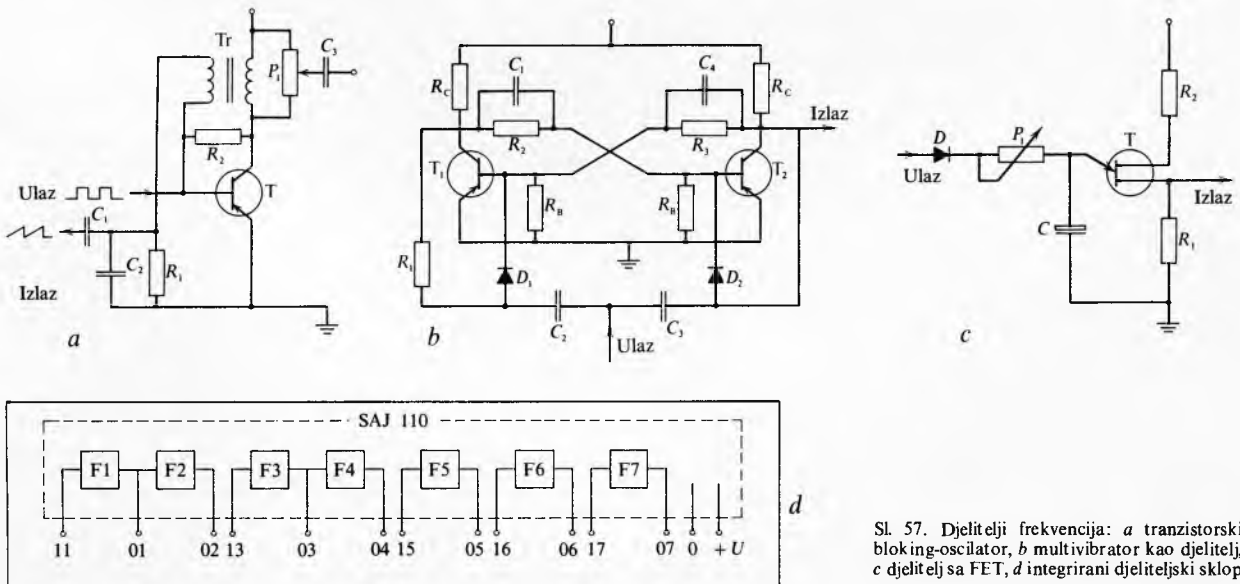
Sklopovi za generiranje tona. Sklop generatora najviše oktave pomoću dvanaest neovisnih djeliteľja (sl. 56) načinjen je s jednim integriranim sklopom u kojemu se nalaze djeliteľji za svih dvanaest tonova najviše oktave i glavnog oscilatora koji je izveden s FET kao modificirani Colpitzov oscilator.



Sl. 55. Shema logičkog integriranog sklopa za dijeljenje u alternirajućem redu



Sl. 56. Shema sklopa za dobivanje tonova pomoću dvanaest neovisnih djeliteľja u jednom integriranom sklopu



Taj je sklop neosjetljiv na promjene napona napajanja i promjene temperature. Serijski titrajni krug (LC_3) određuje frekvenciju oscilatora (0,841 MHz), a primjena FET smanjuje njegovo opterećenje.

Tablica 8
DJELITELJI ZA DOBIVANJE NIŽIH
TONOVA OD OSNOVNOG TONA
($f_0 = 841,28$ kHz)

Ton	Djelitelj	Frekvencija Hz	Standardna frekvencija Hz
a^4	239	3 520	3 520,0
$g^{\#4}$	253	3 325,22	3 322,4
g^4	268	3 139,1	3 136,0
$f^{\#4}$	284	2 962,25	2 960,0
f^4	301	2 794,95	2 793,8
e^4	319	2 637,24	2 637,0
$d^{\#4}$	338	2 488,99	2 489,0
d^4	358	2 349,94	2 344,3
$c^{\#4}$	379	2 219,74	2 217,5
c^4	402	2 092,74	2 093,0
$b^{\#3}$	426	1 974,84	1 975,6
b^3	451	1 865,37	1 864,8

U tabl. 8 navedeni su brojevi dijeljenja za svaki ton, a oni se nalaze između 239 i 451. Relativna pogreška s obzirom na najvišu oktavu iznosi 0,113%.

Djelitelji frekvencija. Drugi važan dio generatora tonova jesu djelitelji frekvencija u omjeru 2:1. Pri izboru djelitelja važan je valni oblik koji se dobiva na izlazu. U početku su bili razvijeni djelitelji kao serijski spojeni bloking-oscilatori spojeni induktivno, te odvojeni bloking-oscilatori spojeni promjenljivom kapacitivnom vezom. Na sl. 57a prikazani su tranzistorski bloking-oscilatori koji na izlazu daju pilasti napon.

Veoma često se kao djelitelji upotrebljavaju bistabilni multivibratori, iako im je izlazni signal pravokutan, zbog jednostavnosti izvedbe. Na sl. 57b je multivibrator koji se primjenjuje u orguljama. Posebno je jednostavno dijeljenje sa FET gdje se na izlazu može dobiti pravokutni i pilasti napon (sl. 57c).

U suvremenim elektroničkim glazbalima najviše se upotrebljavaju integrirani djelitelji frekvencija (sl. 57d), koji su se razvili od bistabilnih multivibratora.

Prijelazne pojave. Uz dosad navedene karakteristike potrebno je promatrati i prijelazne pojave, tzv. tranzijente, jer su glazba i govor prijelazne pojave, pa se pojavljuju nagle promjene zvučnog tlaka i frekvencije.

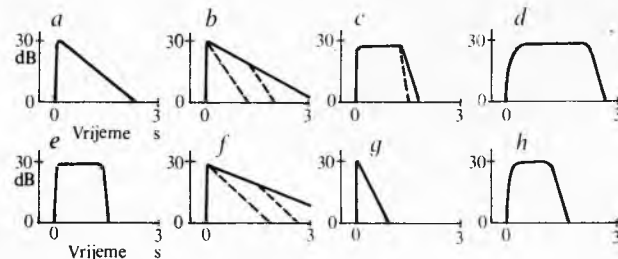
Vremenski interval glazbenog zvuka sadrži trajanje porasta, stacionarno stanje i trajanje opadanja. Najviše informacija o kvaliteti tona daje spektralni sustav, koji je kvantitativna mjera boje tona (fazni odnosi komponenata u spektru praktički ne utječu na boju tona). Efektivnim zbrajanjem komponenata dobiva se ukupna glasnoća. Dakle, sve promjene u tonskom spektru uzrokuju i kvantitativnu promjenu tona. To znači da će na zvučnu sliku veoma utjecati i oblik i jakost porasta tona i trajanje opadanja tona, tj. ovojnica tona (anvelopa). Pri tom valja imati na umu da i odjek prostorije može imati velik utjecaj.

Porast tona što ga zrači glazbalo jest vrijeme potrebno da neki ton postigne neki dio svoje konačne vrijednosti. **Opadanje tona** je vrijeme potrebno da jakost tona od neke razine padne na neku drugu nižu razinu. Karakteristike porasta i opadanja djeluju na visinu, glasnoću i boju tona.

Karakteristike porasta i opadanja tona nekih glazbala (sl. 58) ovise o vrsti glazbala, načinu pobuđivanja tona, o frekvenciji i mijenjaju se s promjenom glasnoće. One su tipične za skupinu glazbala. Karakteristike porasta i opadanja tona žičanih trzalačkih glazbala (gitara, tambura, mandolina, citra, harfa, klavičembalo) prikazane su na sl. 58a. Potencijalna energija sadržana u potegnutoj žici naglo se oslobađa otpuštanjem žice. Zbog toga je trajanje porasta tona veoma kratko. Trajanje je opadanja tona naprotiv relativno dugo, jer je za ta glazbala

omjer akustičke reaktancije i otpora zračenja titrajnog sustava dosta velik.

Karakteristika porasta i opadanja tona žičanih glazbala s batićem (glasovir) prikazana je na sl. 58b. Titrajni sustav čine deblja žica i veliko tijelo, a pobuđuje se batićem koji udara u žicu. Brzi pomak batića naglo pobuđuje titrajni sustav, pa je i trajanje porasta tona kratko. Zbog velikog omjera akustičke reaktancije i otpora zračenja trajanje je opadanja tona dugo. Trajanje opadanja postaje kraće kad prigušivač pedala ili tipka dodiruje žicu (isprekidana crta na sl. 58b). Gudačka glazbala (violina, viola, violončelo i kontrabas) imaju veoma kratko trajanje porasta tona zbog načina pobuđivanja (povlačenje gudačkom po žicama), a trajanje je opadanja tona slobodne žice relativno dugo. Međutim, kad je gudač položeno na žicu, trajanje opadanja tona postaje sasvim kratko (isprekidana crta na sl. 58c).



Sl. 58. Karakteristike porasta i opadanja tona nekih glazbala. a trzanje žice (gitara), b udaranje žice (glasovir), c povlačenje gudača po žici (violina), d velike svirale orgulja, e duhačka glazbala, f udaraljke s definiranom visinom tona, g bubnjevi, h glas

Dubokotonske svirale orgulja imaju vrlo veliki omjer akustičke reaktancije i otpora zračenja. Također je i akustička impedancija generatora relativno velika. Posljedica je toga dugo trajanje porasta i opadanja zračenog tona (sl. 58d). Karakteristike porasta i opadanja tona duhačkih instrumenata u kojima se ton dobiva titranjem zračnog stupca, mehaničkog piska ili sviračevih usnica prikazane su na sl. 58e. Većina tih glazbala proizvodi tonove u sredini čujnog područja. Rezonantni je sustav zrak koji titra u cilindričnoj, konusnoj — eksponencijalnoj ili nekoj drugoj cijevi. Omjer je akustičke reaktancije i otpora zračenja manji nego u drugim glazbalima. Zbog toga je kratko trajanje porasta i opadanja tona. Titrajni sustav udaraljki s definiranom visinom tona (vibrafon, ksilofon, celesta, zvončići, zvono i sl.) pobuđuje se batićem. Kinetička energija brzog udarca batića prenosi se na titrajni sustav u vrlo kratkom vremenu, stoga je i trajanje porasta tona vrlo kratko (sl. 58f). Titrajni sustav tih glazbala ima relativno veliku masu, a otpor zračenja je vrlo malen. Zbog toga je trajanje opadanja tona predugo, a ono se može skratiti prigušivačima (isprekidana crta na sl. 58f). Trajanje je porasta tona bubnjeva (sl. 58g) kratko, jer se pobuđuje palicama ili batićima. Masa titrajnog sustava je malena, a otpor je zračenja zbog većih titrajnih površina relativno velik. Omjer akustičke reaktancije i otpora zračenja relativno je malen, pa je trajanje opadanja tona relativno kratko.

Portamento je poseban način porasta i opadanja tona. To je prijelaz od tona jedne na ton druge frekvencije, izveden kontinuiranim klizanjem preko svih međuintervalu. Portamento mogu izvesti samo glazbala s kontinuiranom promjenom visine tona (gudačka glazbala, tromboni). Prosječno trajanje portamenta iznosi 0,12–0,14 s.

Stacionarno stanje zračenog tona glazbala vrijeme je ukupnog odziva u kojemu se zvučni odziv ne mijenja mnogo s vremenom. Trajanje tona sastoji se od vremena porasta i opadanja i vremena stacionarnog stanja. Iz karakteristika vremena zvučnog odziva (sl. 58c, d, e) vidi se da gudačka glazbala, cijevne orgulje i glazbala u kojima titra zračni stupac, mehanički pisak ili sviračeve usne sadrže stacionarno stanje. Prema slici 58a, b, f, g, može se zaključiti da trzalačka glazbala, glazbala s batićem i udaraljke ne sadrže stacionarno stanje.

Trajanje tona jest vrijeme unutar kojeg se ton zračen iz glazbala održava bez prekida ili diskontinuiteta. Karakteristike

trajanja utječu donekle na visinu, glasnoću i boju tona. Prema trajanju tona glazbala se razvrstavaju na glazbala sa stalnim trajanjem, promjenljivim, ali stalnim maksimalnim trajanjem, i ona s neograničenim trajanjem.

Glazbala su određenog trajanja tona harfa, gitara, citra, mandolina, bendžo, tambura, glasovir, ksilofon, zvončiči, celesta, zvana, timpani, bubanj, tamburin, gong, čineli, kastanjete itd. Takva glazbala imaju ovojnicu koja naglo raste, a nakon postignutog maksimuma opada relativno polagano. Zvučni odziv može se mijenjati promjenom pobudne sile.

Glazbala u kojima su tonovi promjenljivog ali određenog maksimalnog trajanja jesu gudačka glazbala, flaute, harmonike, drvena i limena duhačka glazbala. Gudačka glazbala imaju maksimalno trajanje tona koje je određeno povlačenjem cijelim gudačkom u jednom smjeru. Za duhačka glazbala maksimalno trajanje tona ograničeno je trajanjem duhanja.

Glazbala koja proizvode tonove neograničenog trajanja jesu: cijevne orgulje, orgulje s mehaničkim jezičcem, gajde i električne orgulje.

Dobivanje boje tona

Svako glazbalo karakterizirano je svojom posebnom bojom tona prema kojoj ga se i može prepoznati. Ona je, među ostalim, uvjetovana načinom nastajanja tona, vrstom, oblikom i konstrukcijom glazbala. Fizikalno gledano, boja tona određena je brojem viših harmonijskih frekvencija, tzv. harmonika (nadtonova, nadvalova) i njihovim jakostima. Isto tako je ovisna i o prijelaznim pojavama prilikom nastanka i prekida tona (v. *Elektroakustika*, TE 4, str. 298).

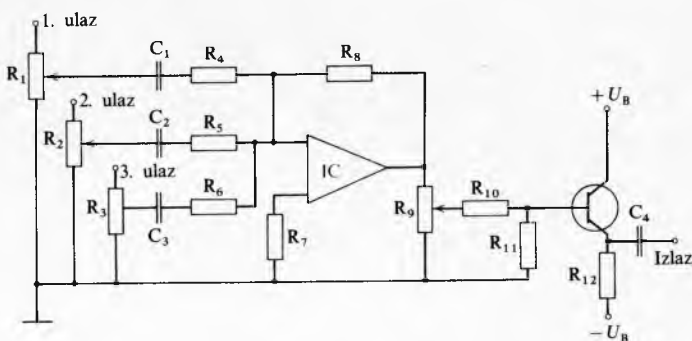
Mekoću nekom tonu daje prisutnost prvih pet do šest harmonijskih frekvencija. Koncentracija energije viših harmonijskih frekvencija u području 1...1,5 kHz daje tonu glazbala nazalni karakter, a ako je veći dio energije u području od ~3 kHz, zvuk postaje oštar. Osobito oštar (rezak) zvuk dobiva se slabljenjem nižih i pojačanjem viših harmonijskih frekvencija.

iz složenog tona bogatog nadvalovima; digitalno dobivanje boje tona, promjenom valnog oblika i drugo.

Harmonijska sinteza veoma je dobar postupak za dobivanje boje tona, pa se mnogo primjenjuje u elektroničkim orguljama. Th. Cahill uspostavio je temelje harmonijske sinteze i oni su se uglavnom održali do danas.

Sastoji se u tome da su kao tonovi temperirane glazbene ljestvice uzeti osnovni tonovi i više harmonijske frekvencije. To je svakako moguće za tonove s rednim brojem 2ⁿ, a za temperirane kvinte (treća i šesta harmonijska frekvencija) i temperirane terce (peta harmonijska frekvencija) postoji neznatno odstupanje. Zbog velikog odstupanja sedme, desete i dvanaeste harmonijske frekvencije, od prvih dvanaest nadvalova ne mogu se upotrijebiti jer bi prouzročile disonanciju.

Signali željenih harmonijskih frekvencija dovode se iz generatora pojedinih tonova preko otpornika na ulaz mješala (sl. 59). Više harmonijske frekvencije s pripadnim amplitudama, koje se pomoću sklopki dovode na pojačalo za miješanje, određuju različite boje tona.



Sl. 59. Sklop za dobivanje boje tona miješanjem nekoliko harmonijskih frekvencija

Tablica 9
FREKVENCIJSKA STRUKTURA TONA c^1

Ton	c	c^1	c^2	g^2	c^3	e^3	g^3	c^4
Frekvencija	130,8	261,6	523,3	784	1046	1319	1568	2093
Omjer s osnovnim tonom	1 : 2	1 : 1	2 : 1	3 : 1	4 : 1	5 : 1	6 : 1	8 : 1
Harmonijska frekvencija	sub	1	2	3	4	5	6	8
Nadton			1	2	3	4	5	7
Interval	oktava	unison ili čista prima	prva oktava	kvinta	druga oktava	terca	kvinta	treća oktava
Oznaka registra	16'	8'	4'	2½'	2'	1½'	1¼'	1'

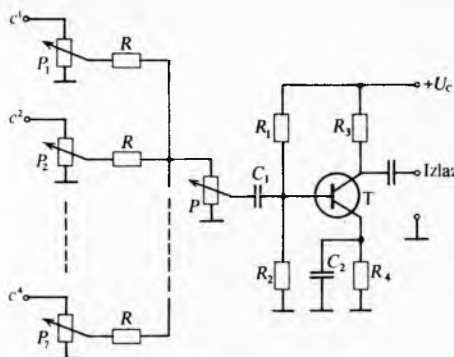
Zapravo, pri višim registrima prevladava osnovni ton, a pri nižim veći dio energije sadržan je u nadvalovima. Odsutnost ili smanjenje jakosti nekih nadvalova daje posebnost boji tona. Veoma slabe parne harmonijske frekvencije u spektru karakteristične su za klarinet. Jako izraženi drugi i četvrti nadval daju svijetlu boju zvuku (trublja, saksofon, gudačka glazbala). Za gudačka je glazbala karakteristično da su nadvalovi oko 1500 Hz oslabljeni, a oni od oko 3500 Hz pojačani.

Očekivanje da će elektroničko glazbalo omogućiti dobivanje najrazličitijih boja tona nije u potpunosti ispunjeno. Uho je nesposobno da raspozna tako mnogo različitih boja koje bi se mogle dobiti tim glazbalima. Glazbala se mogu razlikovati po boji zbog velike različitosti njihovih spektara. Tu tvrdnju dokazao je interesantan pokus. Ako se na magnetofon snime tonovi trublje i flaute i odstrane početni tranzijenti, teško je razlikovati stalan ton trublje od tona flaute.

Mogućnosti su dobivanja boje tona višeglasnim i solo instrumentima mnogobrojne. Da bi se dobila boja tona, odnosno željeni spektar nekog tona, načelno postoje sljedeće mogućnosti: harmonijska sinteza (aditivna metoda), tj. sinteza sinusnih tonova određenog rednog broja i amplitude; selekcija nadtonova (formantna metoda), tj. izdvajanje određenih komponenata

U tabl. 9 prikazana je frekvencijska struktura tona c^1 (261,6 Hz) dobivenog frekvencijskom sintezom.

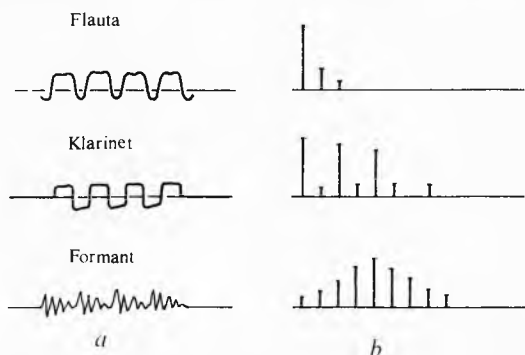
Frekvencijska sinteza provodi se sinusnim valnim oblikom. Budući da generatori tona (analogni i digitalni) veoma često daju složene valne oblike (pravokutne, pilaste itd.), koji sadrže mnogo viših harmonijskih frekvencija, mogle bi se pojaviti ne-



Sl. 60. Sklop za odabiranje razine pojedinih nadvalova prilikom frekvencijske sinteze tona

predviđene i neželjene harmonijske frekvencije. Zbog toga se upotrebljavaju filtri da se dobije sinusni val, i to niskopropusni, oktavni, poluoktavni i uskopojasni filtri. Registarske sabirnice podijeljene su zbog toga, već prema filtru, na sektore i iz njih se dovodi signal na sklop za sintezu (sl. 60).

Valni oblici tonova dobivenih u orguljama pomoću harmonijske sinteze i njihovi spektri vide se na sl. 61. Pomoću elektroničkih uređaja mogu se dobiti različite osnovne vrste zvuka, a jedino se tako mogu dobiti tzv. *miksture*, tj. posebni registri za postizanje različite boje tona pomoću nadvalova.



Sl. 61. Tonovi triju registara orgulja dobiveni harmonijskom sintezom. a valni oblik, b spektar

Obično se upotrebljavaju registri nadvalova 4', 2', 1', nadalje kvinte 2 $\frac{2}{3}$ ', 1 $\frac{1}{3}$ ', te terca 1 $\frac{2}{3}$ '. Miksture se obično izvode kao u klasičnim orguljama.

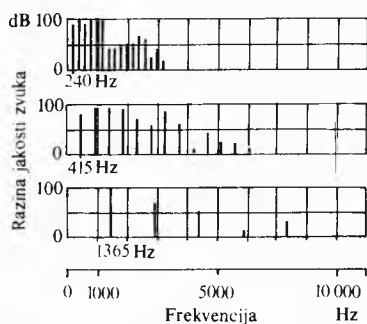
Pri harmonijskoj sintezi treba misliti na utjecaj pojedinih nadvalova na boju tona. Djelovanje oktavnih harmonijskih nadvalova (druge, četvrte i osme harmonijske frekvencije) na boju, vrlo je slično. Ton zvuči svjetlije ako prevladavaju viši oktavni nadvalovi, a tamnije ako prevladavaju niži oktavni nadvalovi. Na boju vrlo utječu neoktavni nadvalovi, npr. treći i peti. Oni naglašavaju visinu osnovnog tona i čine ton ostrim i reskim, dok, naprotiv, oktavni nadvalovi prikrivaju visinu osnovnog tona. Zbog izrazite boje i određene visine ton dobiven relativno jakim neoktavnim nadvalovima pogodan je za solo sviranje. Zbog mogućnosti da u akordu nastanu disonantni intervali takvi se tonovi ne upotrebljavaju za harmonijsko sviranje (više-glasje).

Harmonijski tonovi utječu na sadržaj i boju osnovnog zvuka, a osim toga, svi nustonovi djeluju još i na zvučni dojam intervala.

Iako se u klasičnoj glazbi daje prednost glazbalima s periodičkim tonom, postoje i glazbala koja daju neharmonijski članove, kao timpani, zvona i gong.

Neugodan efekt koji stvaraju neharmonijski članovi u akordu može nastati pojavom brojnih treptaja, ali još više zbog nemogućnosti uha da u mješavini raspozna tonove određene visine.

Formanti i formantna područja. Poslije Helmholtzovih istraživanja, kojima je pokazao srodnost između boje zvuka i harmonijskog spektra, Meyer i Buchmann mjerili su harmonijske spektre na različitim glazbalima u širokom frekventijskom pod-

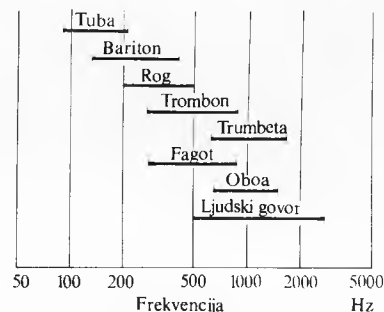


Sl. 62. Spektar triju tonova oboe

ručju. Ta su mjerenja dokazala da se spektri tonova istog glazbala, ali različite visine, međusobno razlikuju. Spektralna analiza triju tonova oboe prikazana je na sl. 62. Ako se promatra na istoj frekventijskoj skali, zapaža se da su neke frekvencije istaknute bez obzira na visinu tona.

Frekventijski selektivni elementi zovu se *formanti*, a područje istaknutih frekvencija *formantno područje*. Neke boje tona, odnosno neka glazbala mogu imati više formantnih područja, što ovisi o fizikalnom svojstvu glazbala koje proizvodi taj ton. Na boju tona utječe naglašenost formantnog područja i širina frekventijskog pojasa.

Neka glazbala imaju vrlo izražena formantna područja, dok druga imaju ta područja manje izražena, ali zato šira (sl. 63). U tonovima različite visine, koji su proizvedeni na istom glazbalu, osjeća se ista boja zbog skoro konstantnog formantnog položaja.



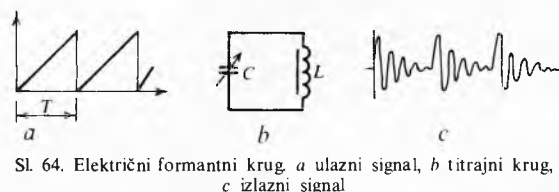
Sl. 63. Formantna područja nekih glazbala i ljudskog govora

Sposobnost uha da raspozna neku sliku formanta i pri najvećoj razlici u visini tona najočitija je pri izgovaranju samoglasnika, koje se lako razumije bez obzira na to da li su izgovoreni sopranom ili basom, ili dječjim glasom. Isto je tako i ton flaute, koji ima vrlo malo nadvalova, malo sličan tonu sinusnog generatora.

Električnu analogiju za formantna zbivanja u muzičkim glazbalima iskoristio je prvi F. Trautwein u elektroničkom glazbalu.

Selekcija nadtonova. Selektivni (formantni, suptraktivni) postupak za dobivanje boje tona osniva se na izdvajanju nekih od nadtonova iz signala bogatog višim harmonijskim frekvencijama.

Jednostavan i često primjenjivan postupak dobivanja boje tona pomoću elektroničkih glazbala jest pobuđivanje rezonantnih krugova naponom proizvedenim generatorom pilastog napona (sl. 64). Dovede li se pilasti napon na titrajni krug CL (elektronički formantni krug), pobuđuje se svakim naponskim udarom rezonantna frekvencija kruga. Prigušivanje je vlastite rezonantne frekvencije eksponencijalno i ovisi o dobroti kruga. Pomiče li se rezonantna frekvencija na više, boja zvuka postaje svjetlija, a ako se pomiče prema nižim frekvencijama ona je tamnija.



Sl. 64. Električni formantni krug. a ulazni signal, b titrajni krug, c izlazni signal

Za selektivno dobivanje boje tona upotrebljavaju se različiti pasivni i aktivni filtri RC i RLC: niskopropusni, visokopropusni, pojasni filtri i pojasne brane.

Niskopropusni filter upotrebljava se za dobivanje mekih tonova, osobito ugodnih u području basova (sl. 65a). Ako se na takav filter dovede pilasti napon, dobiva se boja tona slična flaute i nekim drvenim duhačkim instrumentima. Ako se pak dovede pravokutni napon, dobiva se boja tona slična boji re-

gistra flaute na orguljama sa zatvorenim sviralom. Kad se ne može s jednim filtrom pokriti cijelo tonsko područje, potrebno je spojiti više filtara. Filtar se primjenjuje samo za tonove kojima visina ne prelazi graničnu frekvenciju filtra.

Visokopropusni filtari (sl. 65 b), upotrebljavaju se za dobivanje posebnih boja, a rjeđe za oponašanje boje tona klasičnih glazbala. Ipak, ako je pobuđivan pilastim naponom, boja tona postaje slična gudačkim glazbalima. Ako je granična frekvencija filtra veoma udaljena od frekvencije osnovnog tona pobudnog signala, ton zvuči osobito oštro.

Pojasne brane primjenjuju se za dobivanje zvuka gudačkih instrumenata (sl. 65 c).

Pojasni filtari (formantni filtari) upotrebljavaju se za izdizanje formantnog područja (sl. 65 d). Tonovi izrazitijih boja dobiju se

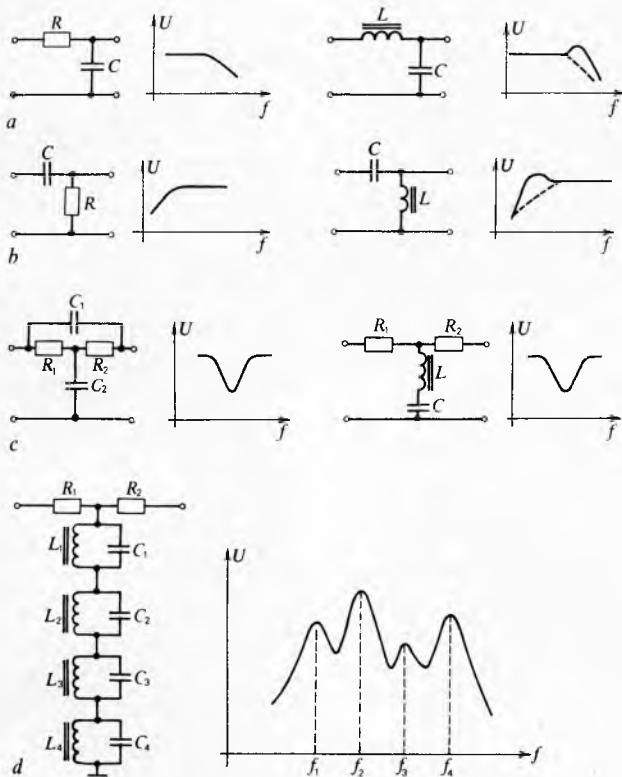
povezivanjem nekoliko rezonantnih krugova različitih frekvencija. Svaki titrajni krug ugođen je na frekvenciju jednog formanta. Oblik rezonantne krivulje ovisi o dobroti titrajnog kruga.

Prednost je takvog dobivanja boje tona što se osjet boje zvuka ne mijenja ni uz veliku promjenu frekvencije pilastog napona. Osim toga pogodnost je i u tome što se promjenom karakteristika elemenata titrajnog kruga (npr. kapaciteta) lako mijenjaju boje. Pri tome se mogu dobiti različite boje prikladnim brojem rezonantnih krugova i njihovom raspodjelom u frekvencijskom području.

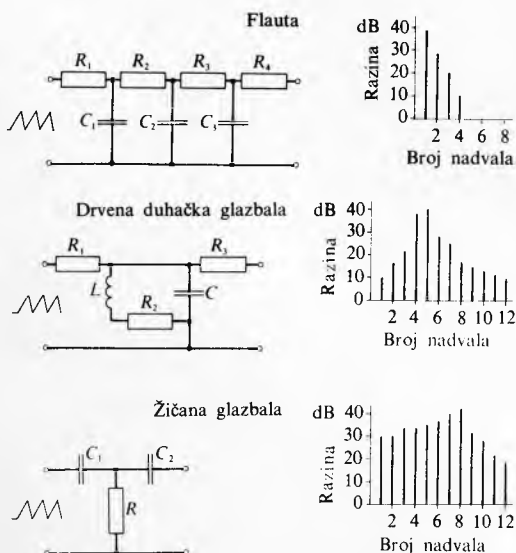
Na sl. 66 su uz spektre tonova flaute, drvenih duhačkih glazbala s piskom, u oktavi iznad *c* i karakterističnog spektra gudačkih glazbala, prikazani i filtri koji omogućuju približno dobivanje tih spektara od pilastog napona.

Trublja ili kornet limeno je duhačko glazbalo slično trubli. Formantnim krugom (sl. 67 a) u području 2000...2500 Hz, uz pobudu s pilastim naponom za registar 4', dobije se najbolja zvučna slika. Najveća sličnost zvuku limenih duhačkih glazbala postiže se ako se nakon nastanka zvuka (vrijeme porasta) blago smanji glasnoća.

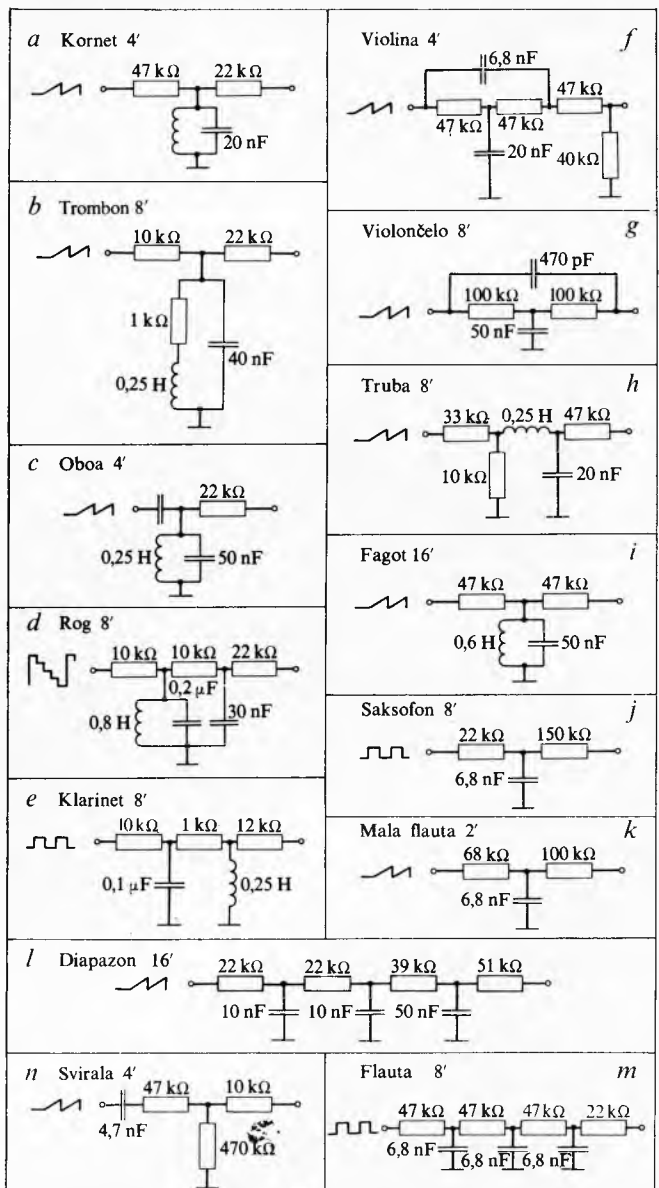
Boja tona trombona dobiva se na isti način kao boja tona korneta, ali je titrajni krug jače prigušen, što se postiže otpornikom u titrajnom krugu (sl. 67 b).



Sl. 65. Filtri za selektivno dobivanje tona. a niskopropusni filtri, b visokopropusni filtri, c pojasne brane, d formantni filtri



Sl. 66. Spektri tonova flaute, drvenih duhačkih i gudačkih glazbala, dobiveni formantnim filtrima



Sl. 67. Sklopovi filtara za selektivno dobivanje boje tona različitih registara na elektroničkim orguljama

Pilastim naponom i u formantnom području 1...1,5 kHz dobiva se boja tona oboe (sl. 67c).

Da se dobije boja tona roga, filter se pobuđuje stepeničastim naponom dobivenim od dva pravokutna signala s omjerom frekvencija 1:2 (sl. 67d).

Budući da u spektru klarineta nema parnih harmonijskih frekvencija, filter se pobuđuje pravokutnim simetričnim signalom (sl. 67e).

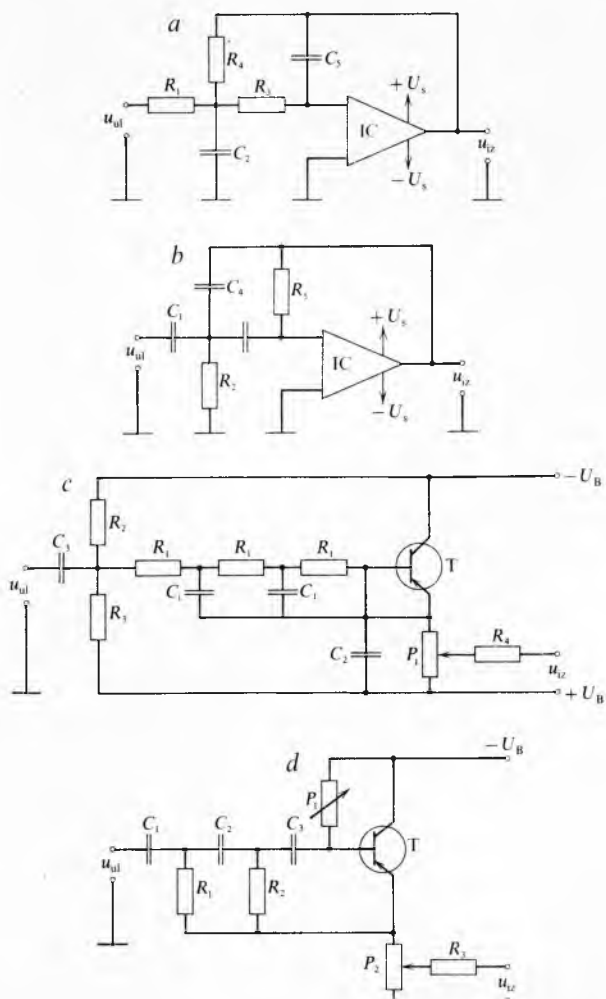
Da se dobiju boje tona violine i violončela (sl. 67f i g), upotrebljavaju se filteri koji prigušuju nadvalove u području frekvencija od 1500 kHz, a pobuđuju se pilastim naponom.

Pilastim naponom pobuđuju se filteri za dobivanje boje tona fagota (sl. 67i), saksofona (sl. 67j), pikolo-flaute (sl. 67k), te nekih tonova karakterističnih za orgulje.

Dobivanje boje tona na principu formanta izvrsno je rješenje za elektronička glazbala koja oponašaju orkestralna glazbala (najčešće monofona), ali se kod elektroničkih orgulja, zbog njihova mnogo većeg tonskog opsega, javljaju određene teškoće. Primjenjuju li se formantni filteri preko cijelog frekvencijskog područja, oni moraju imati neko ograničenje u oštini kako bi glasnoća u cijelom području bila jednaka. Nadalje, upotrebom pasivnih filtera slabe se signali na otpornicima.

Vrlo se dobri rezultati mogu postići primjenom aktivnih RC-filtera (niskopropusnih, visokopropusnih i pojasnih) koji se izvode s tranzistorima ili operacijskim pojačalima (sl. 68).

Slika boje zvuka koju prima uho određena je formantnim područjem ako titrajni proces, neovisno o osnovnom tonu, maksimalno pobuđuje to područje. Fourierovom analizom pokazalo se da se najjače komponente kod nagle (impulsne) pobude titrajnog kruga nalaze u području oko rezonantne frekvencije titrajnog kruga, bez obzira na osnovni ton.

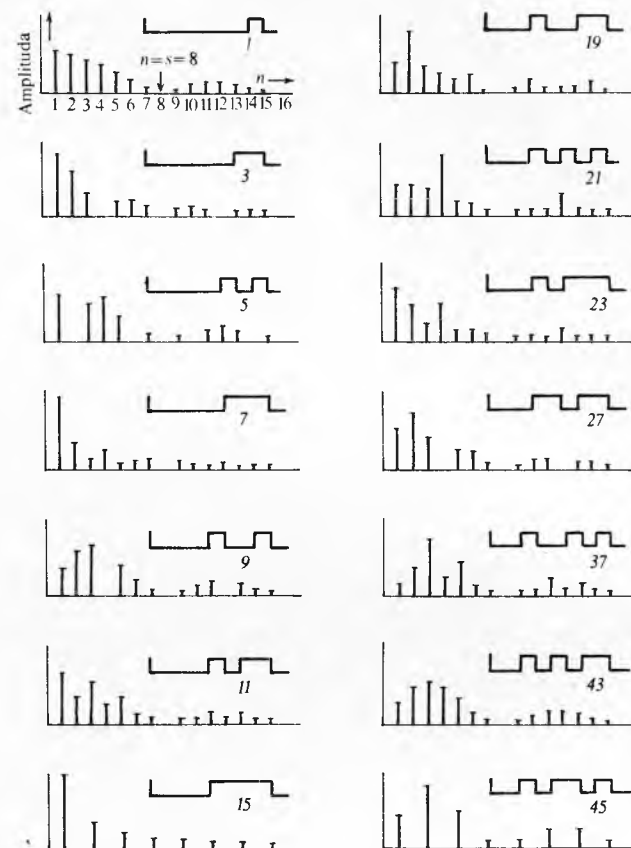


Sl. 68. Aktivni filteri. a) niskopropusni i b) visokopropusni filter s operacijskim pojačalom, c) niskopropusni i d) visokopropusni filter s tranzistorom

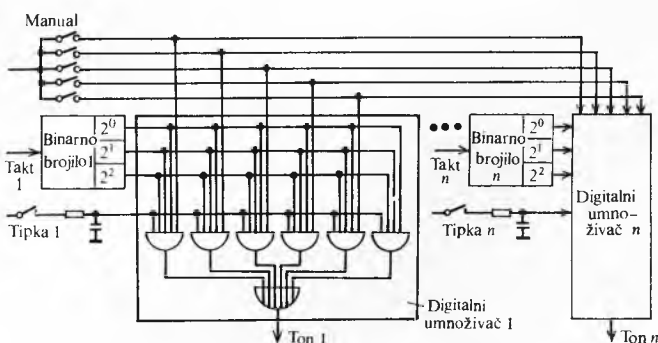
Digitalno dobivanje boje tona omogućeno je brzim razvojem novih, a isto tako i već standardnih integriranih sklopova, kakvi se inače upotrebljavaju u računarskoj tehnici.

Jedan od digitalnih načina dobivanja boje jest postupak izvođenja promjenljivih faznih funkcija iz digitalno pobuđivanog taktog signala.

Da bi se shvatio način rada, treba pogledati spektre kodnih sekvencija 8-bitnog binarnog signala. Broj različitih mogućnosti razdiobe dviju vrijednosti signala, 0 i 1, jest $2^8 = 256$.



Sl. 69. Spektri kodnih sekvencija za 14 različitih kombinacija 8-bitnog binarnog signala



Sl. 70. Sklop za dobivanje kodnih sekvencija

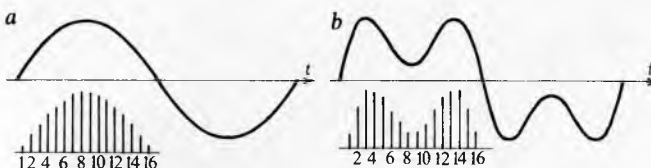
Odbacivanjem simetričnih kombinacija, npr. 00000101 i 11111010, koje se dobiju promjenom polariteta, što daje samo fazni pomak, ali ne mijenja spektralnu sliku, može se izdvojiti samo 14 tonova različitih boja (sl. 69). Sklop za dobivanje kodnih sekvencija vidi se na sl. 70. Frekvencija takta mora biti osam puta viša od frekvencije osnovnog tona. Signal u obliku digitalnog broja prolazi kroz $2^3 = 8$ stanja. Sekvencija se formira u digitalnom umnoživaču (multipleksoru), koji obavlja paralelnoserijsku pretvorbu binarnih podataka. Sekvencije se odabiru tipkom, tj. dovođenjem logičke jedinice. Na ulazu za adresiranje brojilo dovodi označenu odresu ulaza. Na izlazu I-vrata

javlja se jedinica ako su svi ulazi u stanju 1. Izlazi svih osam I-vrata idu na ILI-vrata koja na izlazu daju periodični signal, što odgovara određenom položaju faznih koraka. Za svaki ton potrebno je brojilo i umnoživač.

Veoma je interesantno digitalno dobivanje zvuka primijenjeno u orguljama *Digital Computer Organs* poznatog proizvođača Allen Corp. Umjesto upotrebe oscilatora svi se tonovi dobivaju upotrebom digitalnih programa iz memorije.

U takvim glazbalima svi su procesi upravljani taktnim impulsima frekvencije 1–4 MHz koji se pojavljuju s repeticijom 12 μ s. S generatorom takta spojen je i čitač bušenih kartica. On omogućuje orguljama rekonstrukciju svakog tona koji je programiran na kartici. Upotreba kartice daje gotovo neograničene mogućnosti za dobivanje čujnih nadvalova nekih drugih zvukova. Podatke o visini tona šalju tipke manuala orgulja.

Princip nastajanja pojedinog tona prikazan je na sl. 71. Svaka poluperioda zvučnog signala sadrži seriju od 16 impulsa jednoliko razmještenih unutar poluperiode. Radi jednostavnosti pozitivna su i negativna poluperioda simetrične, pa se negativni polual dobiva inverzijom pozitivnoga.



Sl. 71. Digitalno nastajanje tona pomoću 16 impulsa. a) čisti sinusni ton, b) sinusni ton s primjesom 70% trećeg nadvala

Sinusni oblik (sl. 71a), te kombinacija prvog i trećeg nadvala (sl. 71b) nisu tipični tonovi orgulja, ali su pogodni za objašnjenje. Ovojnica zvučnog signala prolazi kroz 32 točke (16 točaka za svaku poluperiodu). Svaka točka predstavljena je digitalnom riječi (kombinacijom binarnih znamenaka 0 i 1). Te riječi spremljene su u sekvencama u ispisnu memoriju (ROM). Prema tome, amplituda svake od točaka na anvelopi sprema se kao 7-bitni binarni kod, tj. trenutni naponi dani su kombinacijom 7 bitova. Stavljanjem bušene kartice u čitač određuje se, dakle, valni oblik zvučnog signala svih tonova koje generiraju orgulje.

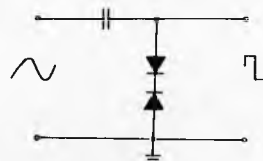
Da bi se dobila određena visina tona, prilikom digitalne sinteze zvuka s manuala orgulja šalje se informacija o repeticijskoj frekvenciji, tj. o trajanju periode pripadajućeg tona. Ta se perioda onda dijeli na 32 intervala, kojima se, kako je već opisano, pridaju pripadne binarne sekvence. Nakon što je signal dobiven u digitalnom obliku, on se dovodi u digitalno-analogni pretvarač gdje se pretvara u analogni signal. Taj se signal zatim vodi na pojačalo, te na zvučnik.

Drugi je način dobivanja boje tona tzv. odzivni način, a sastoji se u digitalnom spremanju, te reproduciranju takva tona. Digitalno spremanje replikativna je sinteza za dobivanje zvuka, a uvedena je da bi se izbjegle teškoće pri izradbi generatora tonova elektroničkih orgulja. Ton se dobiva mikroprocesorom tako da se prvo snime pojedini tonovi dobrih orgulja sa svirala i tonovi nekih drugih klasičnih glazbala koji služe kao modeli. Ti se signali na već opisani način pretvore u digitalni oblik, te se u digitalnom obliku zapisuju na bušene kartice. Zadatak mikroprocesora sastoji se u tome da kartice, koje su stavljene u čitač kartica, pročita i upiše u memoriju. Iz memorije se ton poziva pritiskom na tipku manuala ili pedala o kojoj ovisi frekvencija tona, a jednako tako se oblikuje i ovojnica. Memorija se sastoji od više sekcija. Najvažnija je ROM memorija u kojoj je spremljen program i memorija u kojoj se nalazi tonska informacija. Valni se oblik u memoriji nalazi rastavljen na 32 uzorka.

Postoji još mnogo drugih načina u kojima se za dobivanje boje tona primjenjuju različiti zvučni parametri. Primjenjuju se sinteze frekvencijskom modulacijom, pomoću diskretnih sumacijskih izraza, odnosno između harmonijskih frekvencija, pomoću impulsa oblika kvadratne kosinusne funkcije (tzv. način VOSIM, akr. od engl. voice simulation), upotrebom Walshovih funkcija itd.

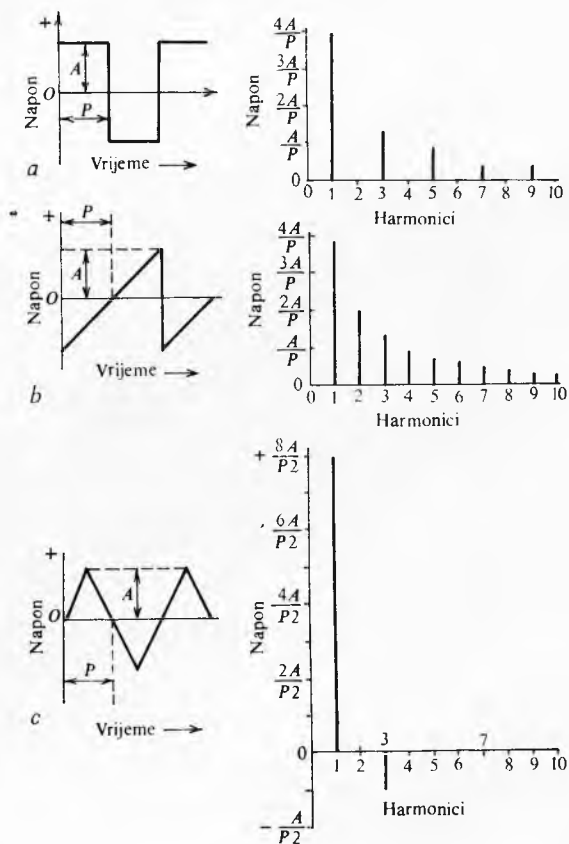
Promjene valnog oblika. Dobivanje boje tona može se postići i promjenom valnog oblika oscilatora. U elektroničkim orguljama upotrebljavaju se, osim generatora sa tri osnovna valna oblika (sinusni, pravokutni i pilasti signal) i modifikacije koje nastaju u pretvaračima valnih oblika.

Sinusni signal (čisti ton) ne sadrži harmonijske frekvencije i zvuči prazno i tamno u nižim registrima visine tona i svijetlo u višem registru. Dakle, on bez naknadne obrade ne dolazi u obzir za selektivno dobivanje boje tona. Primjenom nelinearnih elemenata sinusni se signal može pretvoriti u pravokutni impuls ili impuls bogat harmonijskim frekvencijama (sl. 72).



Sl. 72. Pretvaranje sinusnog signala u pravokutni

U suvremenim sklopovima za generiranje tonova najčešće se upotrebljavaju relaksacijski generatori (multivibratori, blocking-oscilatori), koji daju pravokutne i pilaste signale. Za selektivno dobivanje boje osobito je pogodan pilasti impuls. U spektru pilastog impulsa energija je raspodijeljena gotovo ravnomjerno. Energija dvadesete harmonijske frekvencije manja je od energije osnovnog tona svega 6–7 dB. Na sl. 73 prikazani su spektri za pravokutni, pilasti i trokutasti valni oblik.

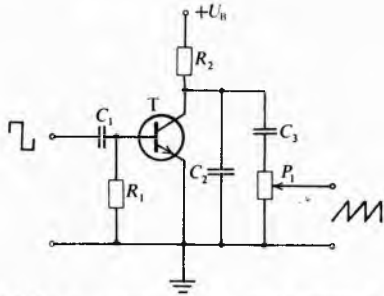


Sl. 73. Spektri pravokutnog (a), pilastog (b) i trokutastog (c) signala

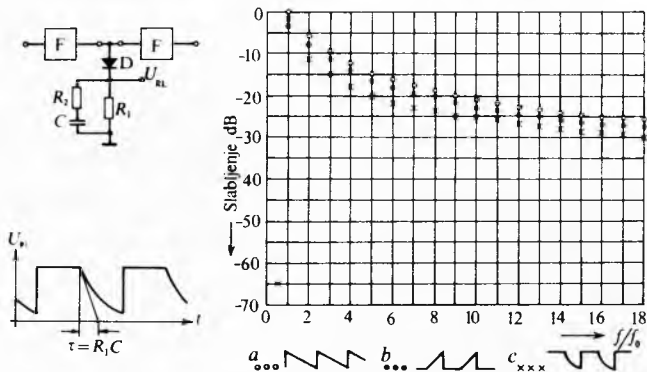
Budući da se za većinu glazbala upotrebljavaju multivibratori kao djelatnici, a oni na izlazu daju pravokutni signal, koji sadrži samo neparne harmonijske frekvencije, u pojedinim se instrumentima upotrebljavaju sklopovi koji taj signal pretvaraju u mnogo pogodniji pilasti signal (sl. 74).

Postoje i drugi načini oblikovanja signala kao npr. RC-sklop (sl. 75). Preko diode nabija se kondenzator C strujom koju

ograničuje otpornik R_2 . Kad je bistabil u položaju 0, kondenzator se prazni preko otpornika R_1 . Vremenska konstanta treba biti $\tau = 0,25 f^{-1}$, a $R_1 \gg R_2$.

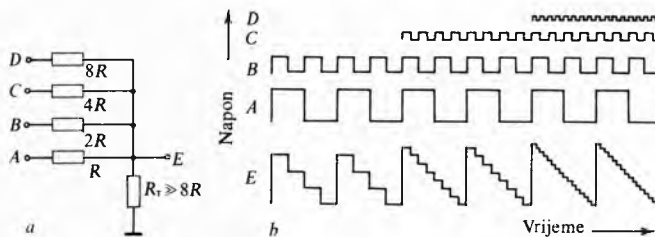


Sl. 74. Sklop za pretvaranje pravokutnog signala u pilasti



Sl. 75. RC-sklop za pretvaranje valnog oblika i grafički prikaz slabljenja signala prema frekvenciji, za tri oblika ulaznog signala a, b i c

Najrašireniji je način oblikovanja tona dobivanje stepeničastog signala iz pravokutnog (sl. 76). Na otporničku mrežu dovode se pravokutni signali dvostruke, četverostruke, a ponekad i osmerostruke frekvencije i upola manje amplitude od prethodne gdje se zbrajaju. Time se dobiva stepeničasti signal, koji je približno jednak pilastom, pa sadrži parne i neparne harmonijske frekvencije.



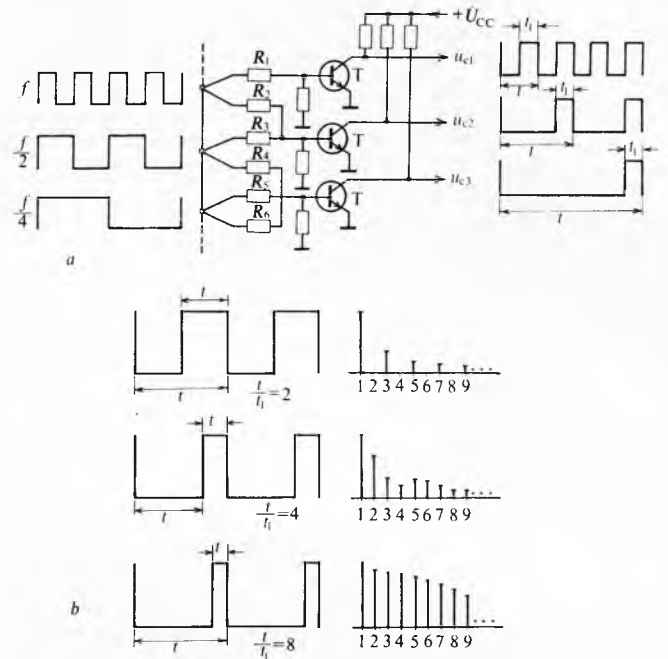
Sl. 76. Dobivanje stepeničastog signala. a otpornička mreža na koju se spajaju izlazi djelitelja, b oblici ulaznih signala A, B, C i D te izlaznog signala E

U tabl. 10 vidi se zastupljenost nadvalova s najvažnijim amplitudnim odnosima za signale kojima su omjeri frekvencija 1:1 do 1:16. Već tri pravokutna signala omjera frekvencija 1:2:4 daju potreban oblik (nedostaje samo osmi nadval).

Tablica 10
ZASTUPLJENOST NADVALOVA U TONU DOBIVENOM
PRAVOKUTNIM SIGNALIMA

Nadval	Spektar nadvalova															
1	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
2		2	6	10		14		18		22		26		30		
4			4		12					20				28		
8				8									24			
16						16										

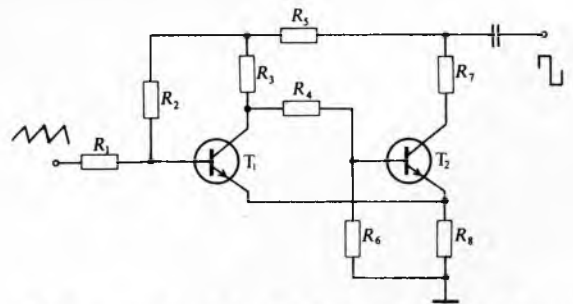
Pretvaranjem pravokutnog impulsa u uže impulse dobiju se valni oblici bogati nadvalovima. Na ulaze tranzistora, koji služe kao NI-vrata, preko otporničke mreže dovode se signali frekvencija f , $f/2$, $f/4$ (sl. 77a). Tako se dobivaju impulsi trajanja $1/4$ i $1/8$ periode. Što su impulsi uži, to imaju širi spektar (sl. 77b).



Sl. 77. Pretvaranje pravokutnog impulsa u uske impulse. a sklop, b spektri impulsa različitih širina

Za postizanje nekih boja zvuka potreban je pravokutni impuls. To se može postići pomoću diferencijalnog pojačala, ili da se pilastom signalu određene frekvencije i amplitude doda drugi protufazni signal upola niže frekvencije i upola manje amplitude.

Za glazbala koja imaju generatore pilastog ili pravokutnog signala, a trebaju sinusni signal, npr. za harmonijsku sintezu, upotrebljavaju se niskopropusni RC-filtri.



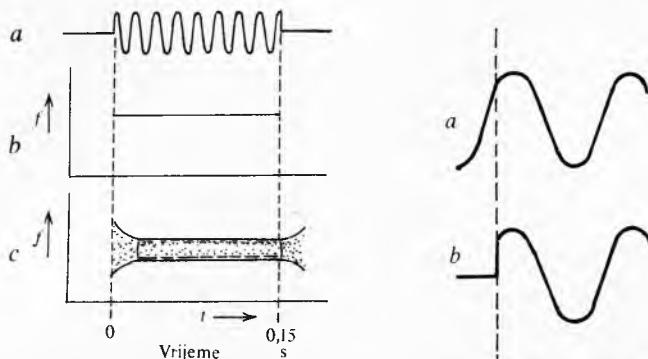
Sl. 78. Schmittov okidni sklop za dobivanje pravokutnog impulsa

Za dobivanje pravokutnog impulsa iz bilo kojeg drugog, upotrebljava se Schmittov okidni sklop (sl. 78). Uz prekoračenje određenog ulaznog napona mijenja se stanje na izlazu. Promjenom praga okidanja može se mijenjati širina impulsa, a dovodenjem pilastog impulsa s promjenljivom istosmjernom komponentom na izlazu dobiju se impulsi različite širine.

Ovojnica tonova i popratni šumovi

U elektroničkim glazbalima mora postojati mogućnost regulacije uključivanja i prekidanja tona. Zbog toga što ritam u glazbi ovisi samo o nastajanju tona uho mnogo više osjeti početak tona nego kasnije zvučenje. Prekid tona, na koji utječe i reverberacija prostorije, osjeti slušatelj tek pri naglom slabljenju tona.

Kad se ton proizvodi elektronički, nastaju nagle promjene intenziteta ili frekvencije, pa ih je potrebno spriječiti. Ton koji je naglo uključen i traje stalnom jačinom 0,15 s prikazan je na sl. 79a. Iako bi takav način nastajanja tona uvjetovao spektar kao na sl. 79b, znači samo jednu frekvenciju, ipak ton ima širi spektar, kao na sl. 79c.

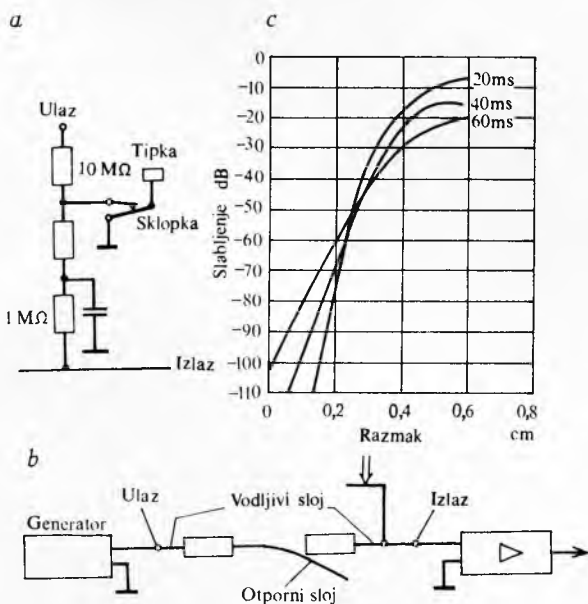


Sl. 79. Nastajanje praska zbog uključivanja i isključivanja signala. a ulazni signal, b idealni oblik signala, c realni oblik signala

Sl. 80. Nastajanje zvučnog udara prilikom uključivanja tona

Nagli nastanak i prekid oscilacije stvara proširenje u vremensko-frekvencijskom spektru, koje se u zvučniku čuje kao udar, tako npr. uključivanjem struje baze (sl. 80) poraste kolektorska struja u vrlo kratkom vremenu, slično kao kad je impuls pravokutan. Tako dobiveni impuls sadrži mnogo jakih nadvalova, pa se u zvučniku čuje glasan udar. Vrijeme potrebno uhu da prepozna visinu tona iznosi ~ 13 ms, a udar koji se zbiva u tom trenutku sprečava da uho čuje upravo onda kad mu je čujnost najpotrebnija. Slušatelj osjeti kao udar i proširenje spektra ako je trajanje nastajanja kraće od 0,01 s, a ako je ono duže od 0,1 s, tada se to osjeti kao kontinuiran porast glasnoće tona.

U oblikovanju tona važna su kolebanja njegove visine i frekvencijska modulacija stvarana šumovima. Ponekad je takav šum u usporedbi s tonom dosta jak (šum gudala, duhanje, udaranje batića). I ti popratni šumovi glazbala, iako bez glazbene tonske karakteristike, utječu na karakterističan zvuk glazbala i omogućuju njegovo raspoznavanje.



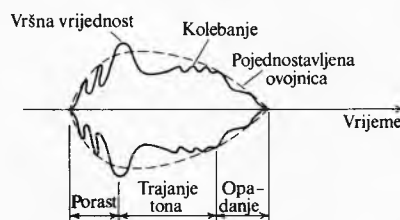
Sl. 81. Sprečavanje nastajanja zvučnog udara. a filter, b mehanički način, c slabljenje tona prema razmaku elektroda pri elektrostatskom nastajanju tona

Udar se može veoma ublažiti upotrebom filtera s dovoljno uskim pojasom (sl. 81). Sadašnje su orgulje izvedene s filterima koji su grupirani po oktavama.

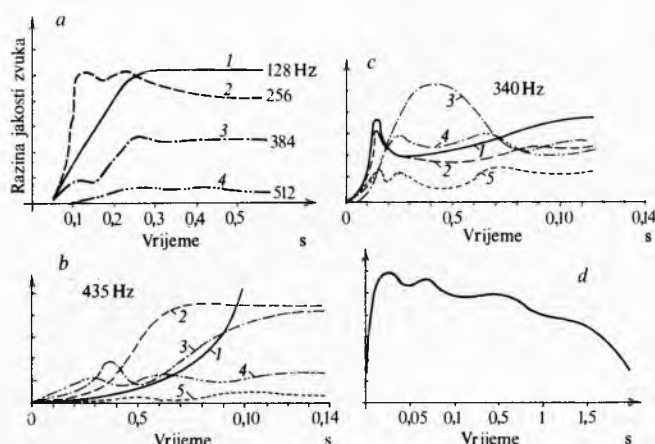
Ipak su sklopovi kojima se upravlja glasnoćom najčešće primjenjivano sredstvo da se spriječi udar i omogući reguliranje prijelaznih pojava pri formiranju tona. Kako je pri uključivanju smanjen napon, udar postaje nečujan. Sl. 81 prikazuje električni i mehanički spoj za sprečavanje udara, te ovojnice dobivene pomoću njih.

Oponašanje popratnih šumova i prijelaznih pojava pri nastajanju tona u klasičnom glazbala bio bi vrlo složen i skup proces. Zato je u elektroničkim orguljama predviđeno u granicama ekonomičnosti samo nekoliko načina nastajanja tonova. Zbog važnosti utjecaja nastajanja i prekida tona na boju tona tome se poklanja posebna pažnja.

Pojedina glazbala međusobno se razlikuju u prvom redu prema obliku tonske ovojnice, a tek onda prema spektralnom sastavu. Na sl. 82 vidi se opći oblik ovojnice, koja može nastati pri realnoj izvedbi, i njen pojednostavljen oblik. Vide se tri osnovna područja: porast tona, vrijeme stalnog tona (stacionarno stanje) i opadanje tona. Ta bi podjela mogla biti i preciznija kad se radi o realnoj ovojnici.



Sl. 82. Opći oblik realne (puna crta) i idealne (isprekidana crta) ovojnice



Sl. 83. Tranzijentni nadvalovi (1, 2, 3...): a orgulja, b violine, c trublje i d glasovira

Na sl. 83 prikazan je način nastajanja tranzijentnih nadvalova orgulja, violine, trublje i glasovira.

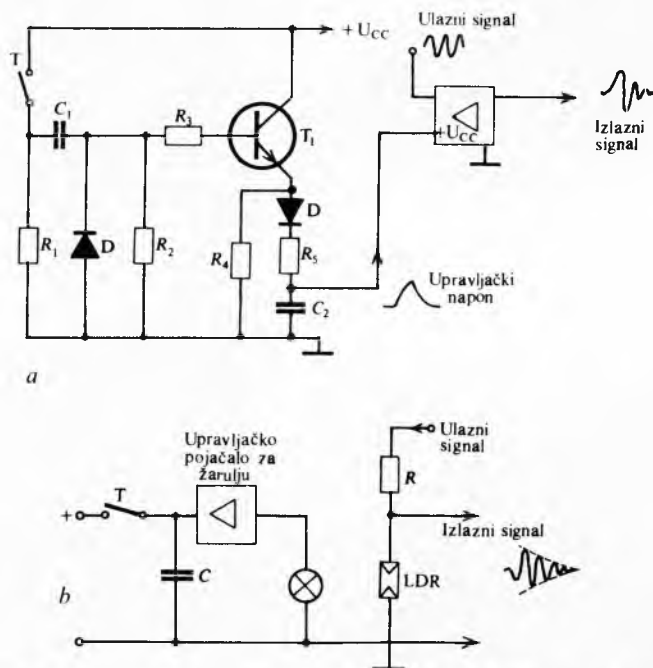
U većini glazbala trajanje porasta tona iznosi 20...120 ms, a za najdublje tonove klasičnih orgulja i do 1 s.

Kao što je pokazano, za oblikovanje služe najčešće RC-članovi, a osnivaju se na punjenju i pražnjenju kondenzatora. U sklopu za oblikovanje ovojnice (sl. 84a) tranzistor zatvara tipku T i na emiteru nastane pozitivni impuls kojim se nabija kondenzator C. Kondenzator se zatim izbija preko pojačala i određuje razinu tona koji se dovodi pojačalu. Izbijanje i nabijanje kondenzatora je eksponencijalno, pa je takva i ovojnica.

Linearniji oblik ovojnice dobiva se upotrebom fotootpornika, odnosno fototranzistora. Pri nabijenom kondenzatoru žaruljica ne svijetli, otpor fotootpornika je vrlo velik (nekoliko megaoma) i ne djeluje na signal. Pri izbijanju kondenzatora pojačalo počinje raditi, postupno se pali žaruljica, otpor se smanjuje i prigušuje signal (sl. 84b).

Signali u orguljama često se razvode za to posebno izvedenim integriranim sklopovima koji daju svakom tonu pravokutnu ovojnicu. Kako takva ovojnica nije prikladna, konstruirani su posebni integrirani sklopovi koji omogućuju dobivanje osnovnih oblika ovojnice. Njihovi uobičajeni nazivi jesu:

Percussion koji označuje naglo nastajanje tona. Trajanje porasta je kratko, a zatim polagano pada. Takav oblik karakterističan je za udaraljke i titrajuće instrumente. Trajanje opadanja tona može se mijenjati.



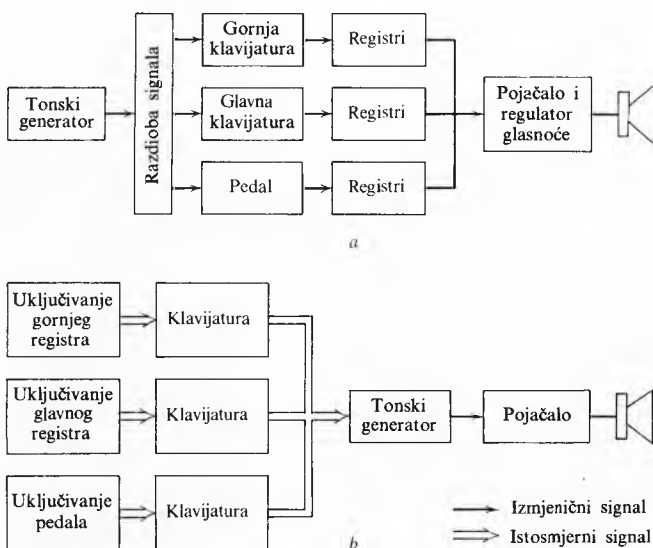
Sl. 84. Sklopovi za dobivanje ovojnice: a s tranzistorom, b s fotootpornikom

Antipercussion (contrapercussion) označuje polagani porast tona i naglo opadanje. Trajanje porasta tona može se mijenjati.

Sustain. Kad je tipka pritisnuta, ton ima stalnu i najveću amplitudu. Nakon otpuštanja tipke ton polagano slabi, kao kod orgulja sa sviralama, duhačkih i gudačkih instrumenata. Trajanje opadanja tona može se mijenjati.

Pianoforte. Glasnoća tona ovisi o jakosti sile koja djeluje na tipku. Tako orgulje zvuče kao glasovir.

Treba spomenuti i dobivanje efekata kao sviranje klavira s pedalom i slično.



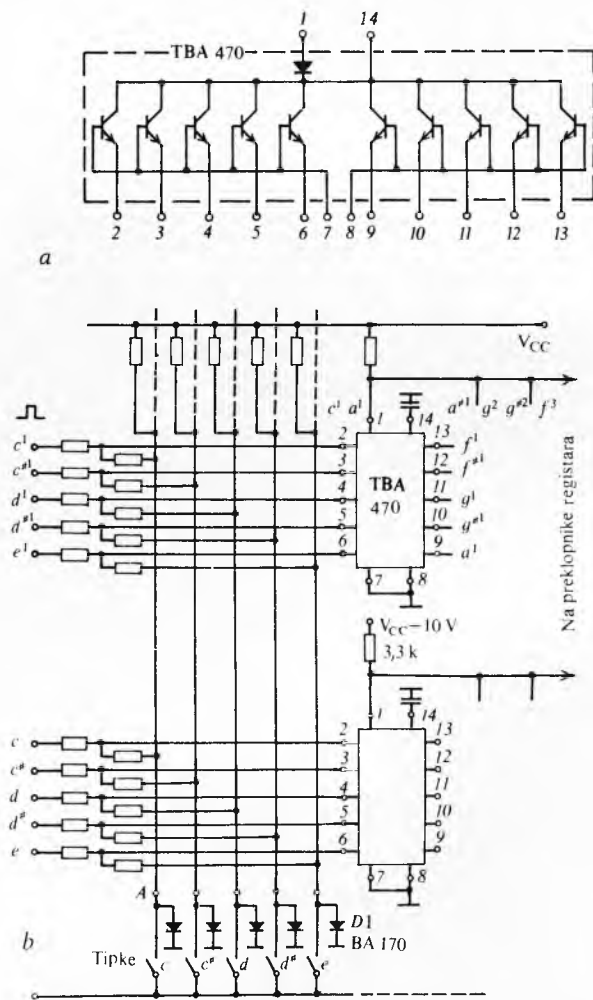
Sl. 85. Sustavi za razdiobu signala. a s jednim oscilatorom i djeljiteljima, b sa dvanaest oscilatora

Razvođenje signala. Za razvođenje signala u elektroničkim orguljama potreban je složen komutacijski sustav. Za to se upotrebljavaju sustavi koji povezuju generator tonova preko klavijature sa sklopovima za dobivanje boje tona (registrima boja i sklopovima za efekte). Osobito je složen sustav za harmonijsku sintezu. Prilikom upotrebe mehaničke komutacije sa m registrara i n tipaka klavijature potrebno je $m \cdot n$ parova kontakata.

Postoje dva sustava razdiobe signala: sustav s jednim glavnim oscilatorom i djeljiteljima te sustav s dvanaest neovisnih oscilatora (sl. 85).

U prvim se elektroničkim orguljama komutacijski sustav izvodio s mehaničkim kontaktima, npr. u Hammondovim orguljama svaka tipka bila je vezana s devet parova kontakata za dobivanje boje tona, a u nekim i sa dvanaest.

U suvremenim orguljama upotrebljavaju se sustavi samo s jednim mehaničkim kontaktom po tipci, ali s diodnim i tranzistorskim komutacijskim matricama. U posljednje vrijeme izrađuju se integrirani sklopovi za komutaciju.



Sl. 86. Integrirani sklop za komutaciju u orguljama. a shema sklopa, b shema razvođenja

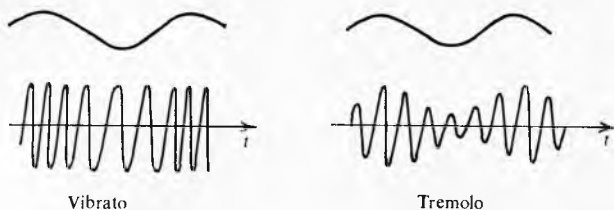
Na sl. 86a prikazan je takav krug, a na sl. 86b način razvođenja. Na emitere tranzistora dovodi se signal iz generatora i istosmjerni negativni napon koji otvara tranzistore, pa se ton dovodi na sabirnicu za registre visine tona. Prekidači za registre nalaze se između sabirnica i sklopova za dobivanje boje tona. Umjesto istosmjernog napona može se priključiti sklop za oblikovanje ovojnice.

Posebni efekti u elektroničkim orguljama. U elektroničkim orguljama vrlo su važni sklopovi za posebne efekte.

Vibrato i tremolo jesu dodatni elementi glazbenog tona. To su efekti koji u klasičnim glazbalima ovise o načinu izvođenja.

Vibrato je ritmičko mijenjanje tona, a tremolo ritmičko mijenjanje glasnoće tona (sl. 87).

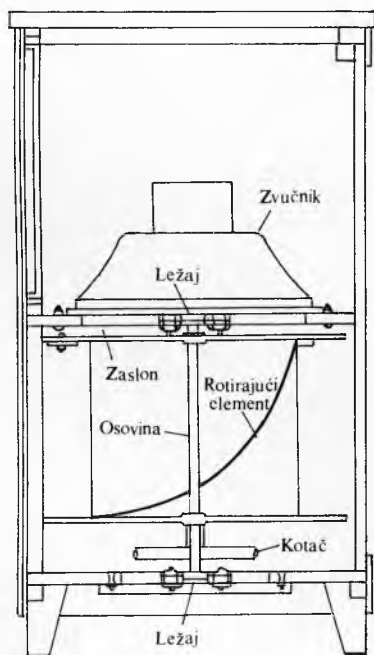
U elektroničkim orguljama vibrato se ostvaruje priključenjem sinusnog signala, frekvencije 5–10 Hz i devijacije za jedan poluton, na generator tona ili na glavni oscilator za digitalno dobivanje tona, čime se frekvencijski moduliraju tonovi. Da se dobije efekt tremola, tonovi se amplitudno moduliraju istom frekvencijom 5–10 Hz. Treba napomenuti da postoji određena razlika između tih pojava dobivenih u elektroničkim i onih u klasičnim glazbalima.



Sl. 87. Grafički prikaz pojave promjene tona, vibrato i tremolo

Za vibrato i tremolo upotrebljavaju se jednostavni oscilatori sa tri RC-sklopa kao zakretni faze za 180° u grani povratne veze, odnosno s dvostrukim T-četveropolom. Vibrato i tremolo izvode se pomoću fotootpornika, tranzistora ili kapacitivno.

Lesliejev efekt je zapravo mehanički tremolo u orguljama. Leslie-tremolo zvučnik, označuje se kao registar cijevnih orgulja elektroničkih orgulja. Glavni je dio motor sa zaslonom koji se okreće oko zvučnika i raspršuje zvuk (sl. 88). Vrtanjem zaslona dobiva se efekt sličan tremolu, jer se mijenja glasnoća. Istodobno se javlja vibrato, iako neznatan, proizveden rotirajućim izvorom zvuka zbog pojave Dopplerova efekta. Brzina je vrtanje $\sim 400 \text{ min}^{-1}$, što odgovara frekvenciji od $\sim 6 \text{ Hz}$.



Sl. 88. Lesliejev sustav za dobivanje efekta tremola

Drugi je način da se na rotirajućem bubnju nalaze 2 ili 3 zvučnika. Svaki od tih zvučnika reproducira određeni glas orgulja. Zvučnik koji se okreće s obzirom na nepokretni zvučnik proizvodi periodičku promjenu faze, a ona se očituje kao zborni efekt (efekt ansambla ili kora).

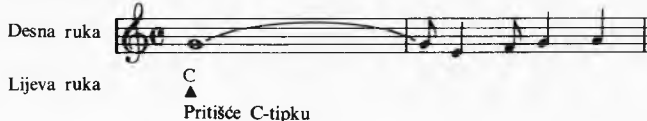
Rotacija može biti i sporija, pa rezultirajući efekt nije više tremolo. Nastali efekt naziva se *Leslie celeste* i sličan je zbornom efektu orgulja sa sviralama. Danas se taj efekt izvodi potpuno elektronički, analogno ili digitalno (npr. pomoću filtra za pomicanje faze).

Zborni efekt dobiva se u orguljama sa sviralama pri istodobnom nastajanju tona u nekoliko svirala kojima se visine tona neznatno razlikuju. U glasoviru se to postiže istodobnim udarcem batića po više žica. U električnim orguljama taj se efekt dobiva, kako je već rečeno, pomoću registra Leslie celeste, jer bi za pravi zborni efekt trebao mnogostruki sustav generatora tona.

Suvremene orgulje opremljene su još i nizom drugih efekata koji, osim što daju poseban zvuk, olakšavaju sviranje. Veoma se često u orgulje ugrađuju ritmički instrumenti koji oponašaju udaraljke (bubnjeve, činele) i mogu davati različite ritmičke oblike koji se mogu po želji mijenjati (suvremeni zabavni ritmovi pop-glazbe i rock-glazbe, valcer, tango itd.), a prema načinu upravljanja uključuju se i isključuju automatski na početku, odnosno nakon završetka sviranja ili pritiskom na tipke manuala, odnosno pedala.

Danas se izrađuju orgulje s potpunom tzv. ritam sekcijom (bubnjevi, bas-gitara i dvije prateće gitare, sl. 89). Već prema odsviranom akordu, tzv. šetajući bas oponaša tonove kontrabasa ili bas-gitare. Akordi cijele prateće sekcije dobivaju se automatski od jednog pritisnutog tona orgulja (dur, mol, septakord itd.). Visina tonova akorda odabire se posebnom klavijaturom. Nadalje, izvode se orgulje s efektom *arpeggio*, *harfe*, *formantnog glisanda* itd.

Rukama se svira:



Orgulje same sviraju:

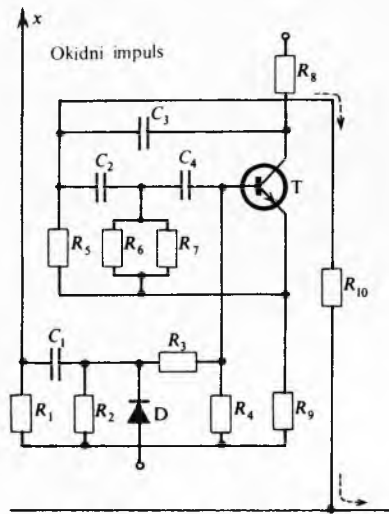


Sl. 89. Elektronička prateća (ritam) sekcija

Formantni glisando izvodi se posebnim filtrima koji ističu formante, pa se postižu efekti slični izgovaranju različitih samoglasnika. Mnoge orgulje imaju i suvremeni elektronički sklop — sintetizator.

Elektronički bubnjevi i ostale udaraljke izvode se kao posebna jedinica, ili u sklopu orgulja, odnosno sintetizatora. Boje i ovojnice tona dobivaju se različitim oscilatorima kojima se privode okidni impulsi, proizvedeni ručno ili automatski. Automatski se impulsi proizvode pomoću generatora ritmova koji su unaprijed programirani u integriranim sklopovima. Da ritam ne bi bio monoton, danas se izrađuju generatori ritma u ka-

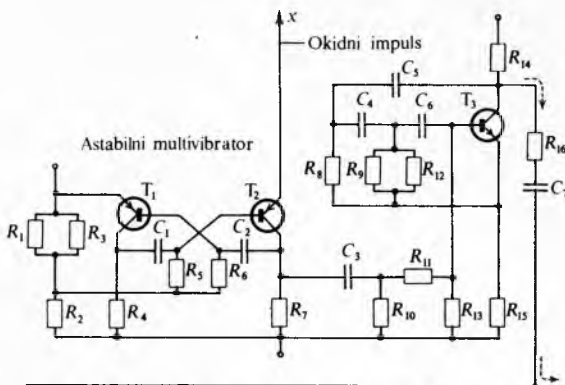
setama s različitim ritmovima. *Oscilator bas-bubnja* (sl. 90) daje frekvenciju potrebnu za visinu tona bas-bubnja. Oscilator oscilira samo onda kad mu se privede okidni impuls.



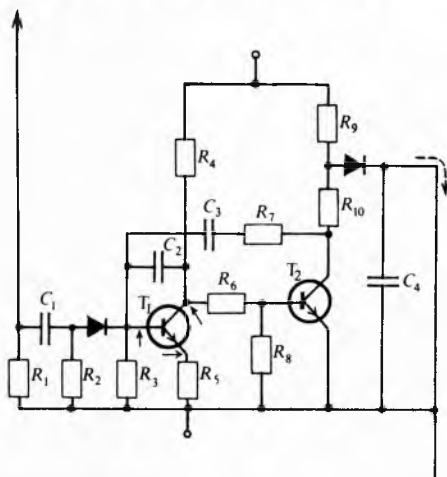
Sl. 90. Shema oscilatora bas-bubnja

Sklop za kastanjete (sl. 91) oscilator je istog tipa kao i za bas-bubanj, koji se ne okida izravno, nego preko astabilnog multivibratora.

Efekt činela sviranih metlicama dobiva se pomoću signala iz oscilatora i generatora šuma. Oscilator je monostabilni multivibrator (sl. 92). U stabilnom stanju tranzistor T_1 bez signala na ulazu ne vodi, a tranzistor T_2 vodi. Kad dođe okidni impuls, on se diferencira i dovede na bazu tranzistora T_1 kojeg otvara.



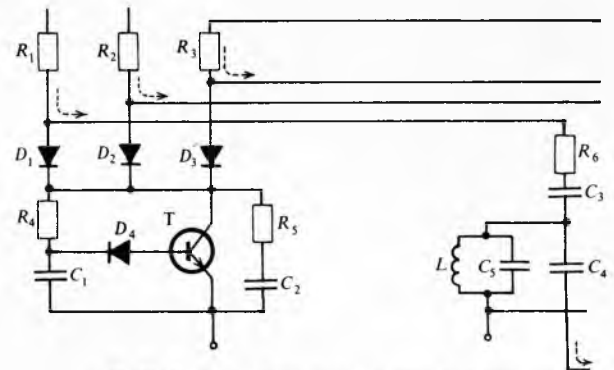
Sl. 91. Shema oscilatora i multivibratora za kastanjete



Sl. 92. Multivibrator i generator šuma za postizanje efekta činela

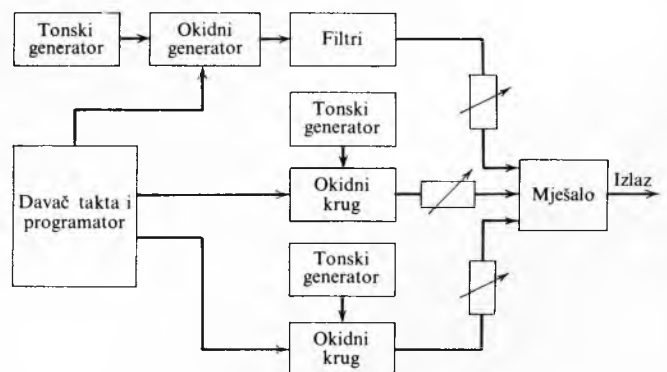
U krugu kolektora dobiva se pojačani i invertirani impuls kojim se zatvara tranzistor T_2 . Padajući napon s kolektora T_2 dovodi se na bazu T_1 i pri tom se kondenzator C_3 nabija. Kondenzator C_3 izbija se kroz otpornike R_3 , R_7 , R_9 i R_{10} i tada ne vodi tranzistor T_1 . U kvazistabilnom se stanju kondenzator C_4 nabija, a u stabilnom se stanju izbija preko generatora šuma.

Generator šuma (sl. 93) dobiva napon iz monostabilnog multivibratora, a napon se dovodi na kolektor tranzistora preko otpornika i diode. Generator šuma moduliran je izlaznim naponom monostabilnog multivibratora. Filtar za dobivanje boje tona sadrži paralelni LC titrajni krug (ugodan na ~ 8 kHz), koji naglašava više komponente šuma radi dobivanja boje činela.



Sl. 93. Generator šuma za postizanje efekta činela

Davači takta i okidnih impulsa. Impulsi za okidanje proizvode se ručno ili automatski. Ručno, pritiskom na određenu tipku u upravljačkoj jedinici ili na tipku klavijature, odnosno pedala. Na sl. 94 prikazana je blok-shema uređaja kojemu su glavni stupnjevi tonski generator, okidni generator, filtri, mješala, davači ritma koji određuju duljinu odsviranog tona i tempo, te programatori koji točno određuju različite plesne ritmove.



Sl. 94. Blok-shema davača takta i okidnih impulsa

Uz navedene efekte mogu se izvesti i različiti drugi efekti pomoću uređaja za obradu signala (procesori signala), koji se upotrebljavaju pri snimanju i reprodukciji zvuka kao: mješalo, ekvalizator, različiti filtri, modulator, komponder, stupanj za umjetni odjek, stupanj za kašnjenje, harmonizator, sklopovi za fazno pomicanje, vokoder, sintetizator i različiti podsklopovi sintetizatora.

ELEKTRONIČKA, SINTETIZIRANA GLAZBA

U elektroničkoj glazbi elektroničkim putem se obrađuje zvuk, koji može biti umjetno proizveden ili snimljen i spremljen u memoriju. Još od prvih dana elektroničke glazbe postojale su poteškoće u brzom upravljanju pojedinim stupnjevima

elektroničkog sustava za dobivanje i oblikovanje zvuka. Mnoge su funkcije upravljane ručno, namještanjem potencijometara, sklopki i preklopnika. Izrađivana su različita elektromehanička pomagala. Sklopovi su bili glomazni i malobrojni. Broj sklopova ograničuje mogućnosti upravljanja izvođača. Mnogi efekti, koji se u suvremenim sustavima ostvaruju s jednim ili nekoliko integriranih sklopova, izvodili su se vrlo složenim uređajima, npr. magnetofonima s posebnim sustavom glava, a i način rada bio je dugotrajan i složen.

Veliki napredak doživjela je elektronička glazba primjenom naponski upravljanih stupnjeva (oscilatora, pojačala, filtera), ekvalizatora i tzv. sintetizatora zvuka. Tako je upravljanje sustavom postalo jednostavnije, a zvukovne su mogućnosti proširene. Omogućeno je preprogramiranje postavljanjem određenih parametara na bušenu karticu, vrpcu ili na neki drugi programirani generator sekvenci. Uz studijske sustave razvijena su i glazbala za neposredne izvedbe.

Dalji razvoj elektroničke glazbe i njezinog izvođenja omogućila su elektronička računala. Počelo se, naravno, s velikim računalima koja su upravljala sintetizatorom ili su sama stvarala zvuk. Razvojem digitalne i računarske tehnike računala postaju manja i jeftinija, a imaju mnogo veće mogućnosti.

Sklopovi s visokim stupnjem integracije LSI omogućili su gradnju mikroprocesora, koji zauzimaju vrlo važno mjesto u elektroničkoj glazbi i glazbalima i sintetizatorima zvuka.

Sintetizator zvuka

Sintetizator (engl. synthesizer) svakako je najpoznatiji generator elektroničke glazbe. Iako se može upotrebljavati za različite svrhe, najčešće se primjenjuje kao jednoglasno elektroničko glazbalo, zatim za dobivanje različitih efekata, oponašanje zvukova klasičnih glazbala, ljudskog glasa itd.

Od 1906. god. kad je načinjen prvi električni sintetizator (Th. Cahill) pa do 1964. kad je prikazan prvi elektronički sintetizator (R. A. Moog), koji je načinio preokret u zabavnoj glazbi, prošlo je gotovo 60 godina.

Uvođenjem programiranja parametara glazbenog zvuka (npr. boje, visine, glasnoće) mijenjaju se njihove kombinacije brzina koje se nisu ni približno mogle postići u doba kad je sintetizator upravljao ručno, pa je sintetizator postao sastavni dio i prijeko potrebno glazbalo u zabavnoj glazbi.

Velike mogućnosti koje sintetizator posjeduje, a koje se mogu proširivati dodavanjem novih modula, ograničene su mogućnošću izvođača, tj. odnosom izvođač—uređaj, pa je konstruiran niz sklopova za povezivanje (engl. interface) koji to olakšavaju.

Sintetizatorski zvuk bira se pomoću klavijature ili preklopnika, ali isto to može biti i mehanizam bilo kojeg klasičnog glazbala, npr. žičanog, pa čak i glas. Pri obradi električnih signala upotrebljavaju se frekvijska i amplitudna modulacija, filtriranje, miješanje, uzorkovanje itd.

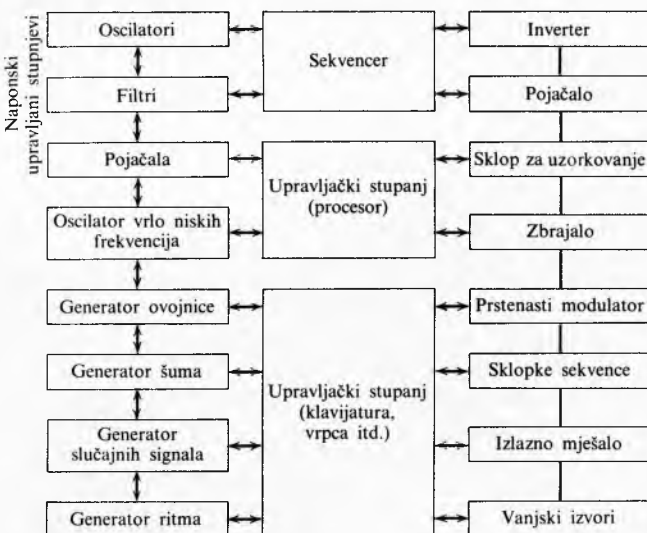
Međutim, svojstva koja sintetizator čine posebnim uređajem dobivena su naponski upravljanim sklopovima. Tako se može

upravljati parametrima kao što su frekvencija, amplituda, dubina modulacije, trajanje porasta i opadanja, odjek itd., i to ne samo ručno već i elektronički programirano.

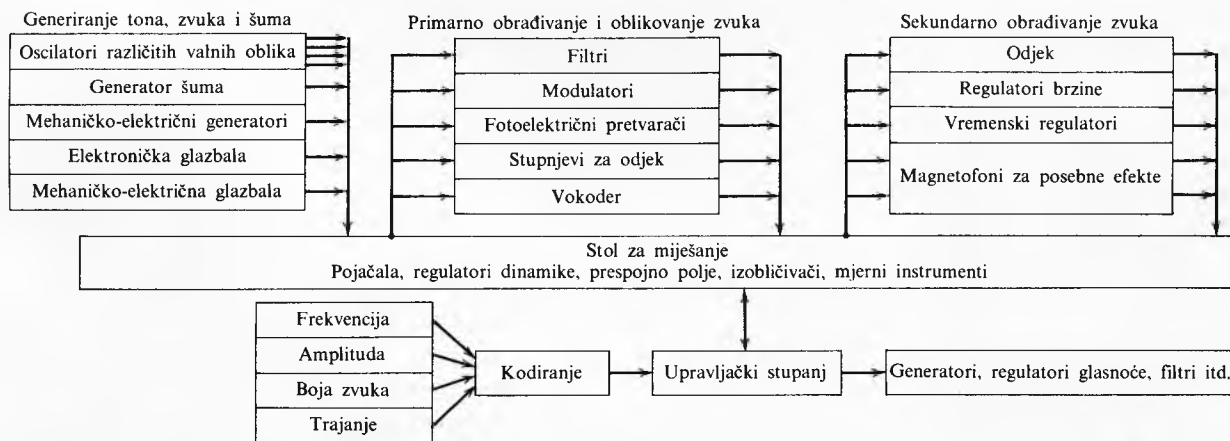
Osnovni stupnjevi sintetizatora. Osnovni stupnjevi od kojih se sastoji sintetizator jesu: naponski upravljani stupnjevi (oscilatori, pojačala, filteri), izvori upravljačkih napona (generator funkcija, generator ovojnice, sklopovi za modifikaciju, generator vrlo niskih frekvencija), izvori šuma (bijeli šum, ružičasti šum i drugi obojeni šumovi, generator slučajnih sekvencija, šum veoma niskih frekvencija, prirodni šum itd.), procesori signala (mješalo, filteri, ekvalizatori, umjetni odjek, harmonizator, modulator, vokoder, sklop za uzorkovanje itd.) i upravljački dijelovi (klavijatura, tipkala, preklopnici, sekvencer itd.).

Osim navedenih sklopova izrađenih kao posebni moduli koji obavljaju određene funkcije i koji se mogu međusobno vezati kao izvori napona upravljanja, upotrebljavaju se i naponsko upravljani oscilator, odnosno složeniji naponsko upravljani sintetizator (engl. Voltage Controlled Synthesizer, VCS). Takav se sintetizator sastoji od više osnovnih stupnjeva: naponski upravljani pojačala, oscilatora i filtera, te generatora ovojnice. Pojedini sklopovi sintetizatora upravljani su vanjskim naponima, a isto tako se izvana određuje kako će pojedini sklop raditi (biranje valnog oblika, biranje filtera itd.).

Stariji studiji elektroničke glazbe sastoje se od mnogo glomaznih uređaja (sl. 95). Suvremeni studio (sl. 96) zapravo je digitalno upravljani, analogni sintetizator, kojemu treba još dodati uređaj za snimanje i reprodukciju zvuka.



Sl. 96. Blok-shema suvremenog studija za elektroničku glazbu — digitalno upravljani analogni sintetizator



Sl. 95. Organizacija i komponente starijeg studija za elektroničku glazbu (1967. god.)

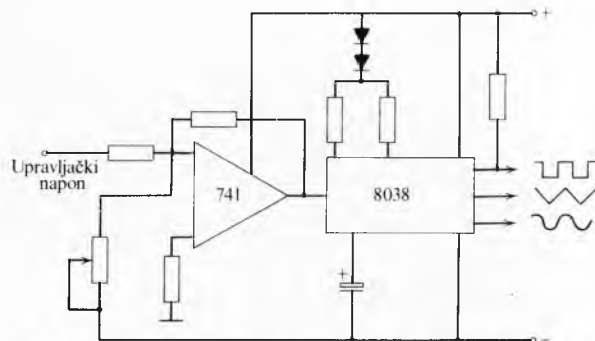
Naponski upravljani stupnjevi

Naponski upravljani oscilator (engl. Voltage Controlled Oscillator, VCO) jest oscilator kojemu se frekvencija mijenja s promjenom istosmjernog napona dovedenog na ulaz sklopa. Osim stabilnosti frekvencije koju treba osigurati generator tonova glazbene ljestvice, takav generator mora omogućiti naponsko upravljanje frekvencijom. To je i razlog što je sintetizator najčešće monofono glazbalo, jer je prilično teško održati relativnu pogrešku u određenim granicama, tj. linearni omjer između upravljačkog napona i frekvencije za sve oscilatore. Frekvencija oscilatora obuhvaća područje od vrlo niskih infrazvučnih frekvencija ($\sim 0,1$ Hz) pa do ultrazvučnih (~ 100 kHz). Razlog je tome da generatori ne služe samo za izravno dobivanje tona, već, npr. kao davači takta, za dobivanje sinhroniziranog upravljačkog napona i sl.

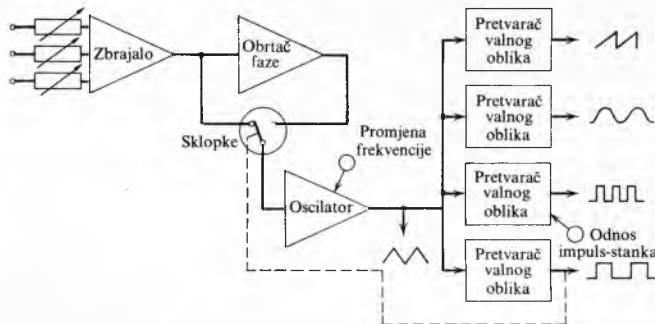
Naponski upravljani oscilator izvodi se tako da se s promjenom upravljačkog napona mijenja radna točka oscilatora, pa se time mijenja frekvencija; dakle tu se primjenjuju svi načini frekvencijske modulacije. Taj sklop treba na izlazu dati različite valne oblike: sinusni, pilasti, trokutasti, pravokutni i impulsni s promjenljivom širinom impulsa. Navedeni valni oblici dobivaju se u sintetizatoru iz oscilatora koji daje samo jedan valni oblik, a ostali se dobivaju pretvaračima valnih oblika (sl. 97).

Izvedbe su sklopova naponski upravljanih oscilatora različite, kao npr. vrlo jednostavni, naponski upravljani astabilni multivibratori, sklopovi s unipolarnim i bipolarnim tranzistorima, sklopovi s operacijskim pojačalima, sami ili s okidnim sklopovima (sl. 98) itd.

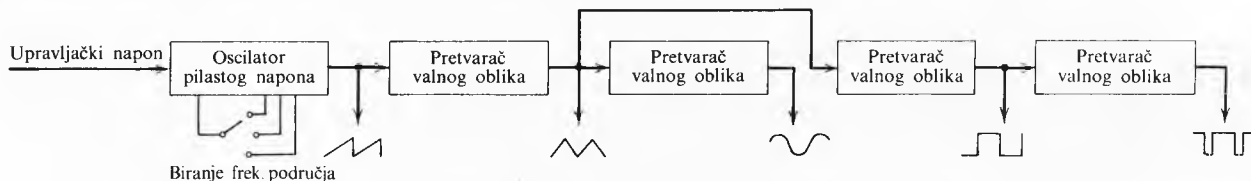
Postoje i složeniji naponski upravljani oscilatori, a danas se proizvode različiti integrirani sklopovi generatora funkcija.



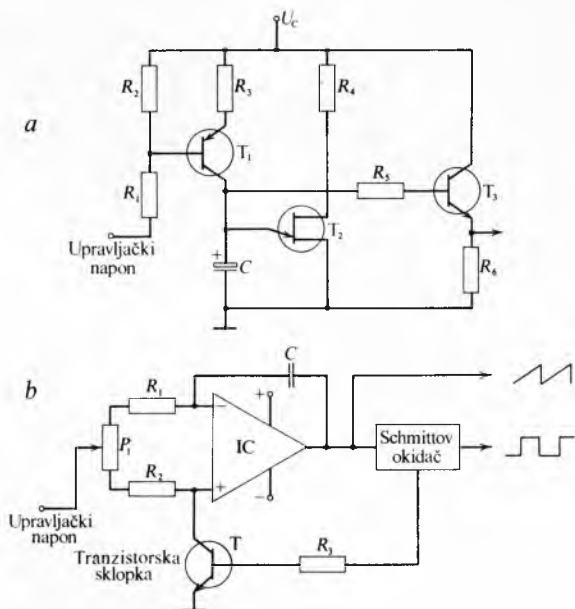
Sl. 99. Naponski upravljani oscilator s generatorom funkcija tipa (8038)



Sl. 100. Cjelovita blok-shema naponski upravljanih oscilatora



Sl. 97. Blok-shema dobivanja različitih valnih oblika iz pilastog impulsa

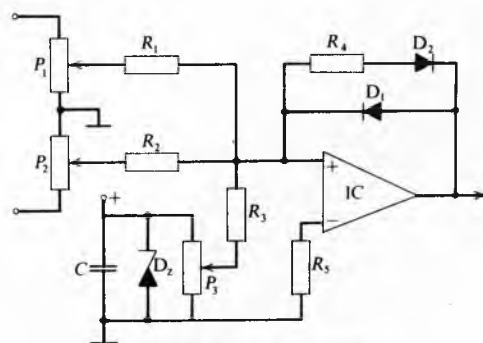


Sl. 98. Naponski upravljani oscilatori: a s jednoslojnim tranzistorom, b s operacijskim pojačalom i Schmittovim okidnim sklopom

Na sl. 99 prikazan je spoj generatora funkcija za tri valna oblika s operacijskim pojačalom.

Uobičajeni naponski upravljani oscilator sastoji se od oscilatora, zbrajala, invertora i pretvarača valnih oblika (sl. 100).

Zbrajalo ili sumator jest sklop s više ulaza koji na svom izlazu daje napon razmjeran ili jednak zbroju ulaznih napona i omogućuje upravljanje frekvencijom oscilatora s više upravljačkih napona. Jednostavan sklop naponskog zbrajala prikazan je na sl. 101. Potencimetrima P_1 i P_2 postavljaju se ulazne naponske razine, a potencijetrom P_3 prednapon. Osnovni je zahtjev za taj sklop stabilnost izlaznog napona.



Sl. 101. Sklop za zbrajanje

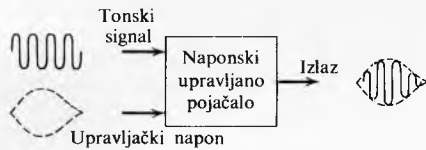
Kao pretvarač valnog oblika, najčešće se upotrebljavaju okidni sklopovi. U suvremenim uređajima upotrebljavaju se integrirani sklopovi u kojima se nalaze svi sklopovi naponski upravljanih oscilatora.

Naponski upravljano pojačalo (engl. Voltage Controlled Amplifier, VCA) sklop je kojemu se, prema istosmjernom naponu dovedenom na ulaz za upravljanje, mijenja pojačanje. Sklop

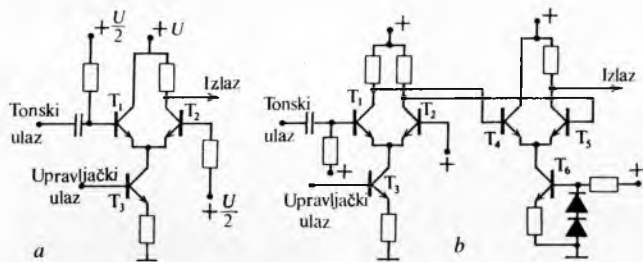
ima dva ulaza: tonski, na koji dolazi tonski signal, i upravljački, na koji se dovodi upravljački napon najčešće iz generatora ovojnice kojim se određuje oblik tonskog signala na izlazu. Naponski upravljano pojačalo važan je dio sintetizatora u kojemu se pomoću upravljačkog napona postižu različite amplitudne modulacije, različiti oblici ovojnice i kontrola dinamike.

Od pojačala se traži da imaju dovoljno široku i linearno frekvencijsku karakteristiku, visoku ulaznu i malu izlaznu impedanciju, što manje izobličenje, te dovoljno velik hod upravljačkog napona.

Takvi su sklopovi načinjeni tako da se promjenom upravljačkog napona aktivnom elementu mijenja strmina, što uzrokuje promjenu pojačanja. Sklopovi naponski upravljano pojačala izvode se s unipolarnim i bipolarnim tranzistorima i integriranim sklopovima. Preko sklopa za oblikovanje ovojnice, npr. pomoću diode, upravljački se napon dovodi na upravljački ulaz, a na tonski se ulaz dovodi signal (sl. 102). Promjenom pojačanja, uvjetovanog oblikovanjem upravljačkim naponom, na izlazu se dobije željena ovojnica. Za naponski upravljano pojačalo veoma je pogodan sklop s diferencijalnim pojačalima (sl. 103). Jednostavno naponski upravljano pojačalo može se načiniti pomoću pojedinačnih elemenata (npr. FET) a složenije pomoću linearnih integriranih sklopova.



Sl. 102. Sklop za dobivanje ovojnice s naponski upravljanim pojačalom



Sl. 103. Naponski upravljana pojačala: a s jednim, b s dva diferencijalna pojačala

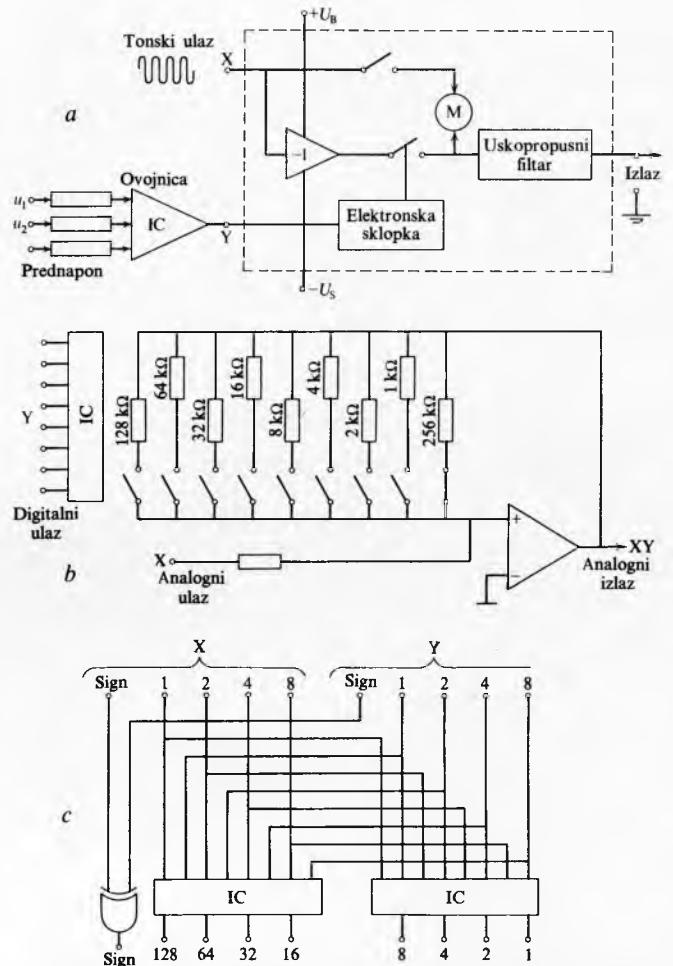
Naponski upravljana pojačala mogu se izvesti s četverokvadrantnim impulsnim množiteljem. Izlazni napon analognih množitelja razmjern je umnošku dvaju ili više napona.

Četverokvadrantni množitelj sastoji se od širinsko-impulsnog modulatora, invertora, elektroničke sklopke, zbrajala i niskopropusnog filtra na izlazu.

Tonski signal dovodi se na ulaz X, a oblik signala ovojnice na ulaz Y. Na izlazu se dobije umnožak obaju signala. Pomoću širinsko-impulsne modulacije ostvaruje se najtočnije množenje analognih veličina. Nije teško postići točnost veću od 0,1% na cijelom području i nelinearnost manju od 0,2%. Potpunu točnost množitelja ne može se postići zbog neznatnih pogrešaka koje unose realni prekidači — unipolarni i bipolarni tranzistori i širinsko-impulsni modulator s Hallovim elementom (sl. 104a).

Opisani analogni množitelji množe dva analoga signala i na izlazu daju opet analogni signal. Međutim, veoma su pogodni množitelji koji množe analogni signal (X) s digitalnim n -bitnim signalom (Y), sl. 104b. Digitalni signal može biti, npr., ovojnica, a analogni tonski signal. Tako dobiven signal iz naponski upravljano pojačala može se izravno priključiti na sklop za digitalno dobivanje boje tona bez digitalno-analognog pretvarača ili izravno na izlaz računala koje generira ovojnicu.

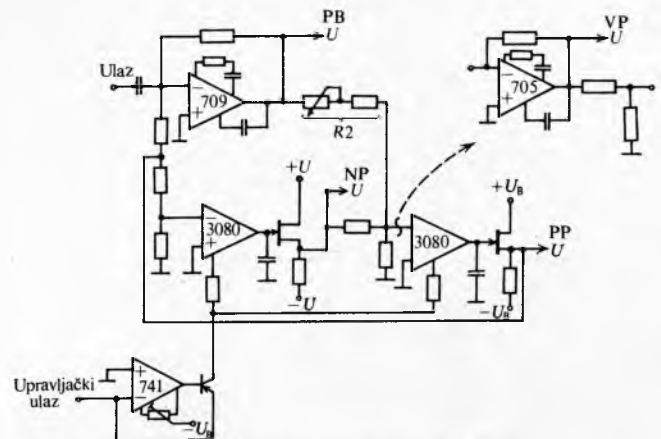
Digitalni množitelj množi dva 4-bitna signala, od kojih jedan može biti tonski signal, a drugi ovojnica i na izlazu daje 8-bitni signal (sl. 104c).



Sl. 104. Množitelji: a analognih signala, b analognog i digitalnog signala, c dvaju digitalnih signala

Naponski upravljani filter (engl. Voltage Controlled Filter, VCF) najčešće je aktivni filter, kojim se pomoću upravljačkog napona mijenjaju, već prema vrsti filtra, donja, gornja ili rezonantna frekvencija, faktor dobrote, područje propuštanja ili gušenja, strmina bokova i sl. Sklopovi koji omogućuju takvo naponsko upravljanje mogu biti s unipolarnim i bipolarnim tranzistorima, fotodiodama, fotočelijama, fotootpornicima, tinjalicama itd. Pri tom se iskorišćuju njihova svojstva da se promjenom napona određene elektrode mijenja statički ili dinamički otpor.

Na sl. 105 prikazan je naponski upravljani filter izveden sa dva integrirana sklopa i operacijskim pojačalima, koji se veoma često primjenjuju u sintetizatorima. Već prema izlazu dobije se



Sl. 105. Univerzalni naponski upravljani filter

i određena vrsta filtra: niskopropusni, visokopropusni, pojasni filter i pojasna brana. Rezonantne, odnosno granične frekvencije linearno su ovisne o upravljačkom naponu.

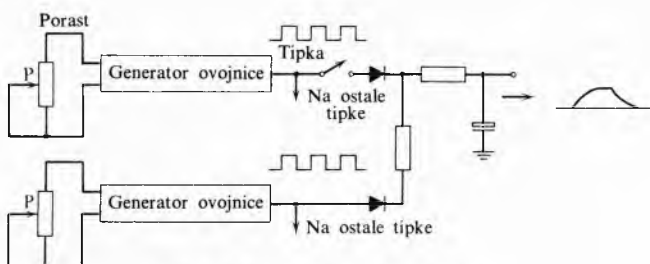
Dobrota filtra određuje se otpornikom R_2 . Pogodna je izvedba naponski upravljaniog filtra pomoću naponskog upravljanja vrijednosti nekog otpora. Analogna preklopka, koja omogućuje brzo uklapanje i isklapanje otpornika, napajana je preko izvora pravokutnog signala konstantne frekvencije kojom se može mijenjati širina impulsa, odnosno omjer impulsa i stanke, što određuje vrijeme uključivanja otpornika. Promjenom tog vremena može se postići bilo koja vrijednost otpornika. Pri tom je potrebno da je frekvencija uklapanja i isklapanja barem 20 puta veća od, npr., središnje frekvencije pojasnog propusta.

Valja pri tom svakako spomenuti i digitalne filtre koji omogućuju izravno priključivanje na digitalne generatore zvuka, a filtrirani se signal može dalje obrađivati u digitalnom obliku. Takav se digitalni filter može simulirati računalom.

Izvori upravljačkih napona mogu se razvrstati u dvije skupine: izvori koji se postavljaju i ugađaju u statičkim uvjetima, te izvori koji se ugađaju u dinamičkim uvjetima, tj. za vrijeme sviranja. Prvi se redovno mogu programirati. Kao izvori upravljačkog napona upotrebljavaju se generatori valnih oblika. To su zapravo sklopovi koji generiraju različite oblike napona i predstavljaju jednu od najčešćih primjena linearnih integriranih sklopova. Razlikuju se generatori harmonijskih valnih oblika i generatori relaksacijskih valnih oblika. Za razliku od drugih sklopova s linearnim integriranim krugovima, koji obrađuju već postojeći signal, generatori valnih oblika (generatori funkcija) generiraju potpuno novi signal, samo s istosmjernim izvorima za napajanje. Oni, prema tome, pretvaraju istosmjerni napon izvora u izmjenične napone različitih oblika (sinusni, pilasti, trokutasti, pravokutni, impulsni). Pri tom se može mijenjati prednji i stražnji nagib impulsa, omjer impulsa i stanke i mogu se dobiti različiti eksponencijalni oblici bridova impulsa. Najčešće se proizvode pravokutni impulsi, a iz njih primjenom logičkih i analognih sklopova drugi oblici impulsa. Takvi se signali mogu primijeniti za različite modulacije, odnosno mogu se dovesti naponski upravljanim stupnjevima.

Ostali sklopovi sintetizatora

Generatori ovojnice. Do sada obrađeni generatori ovojnice bili su jednostavni sklopovi s relativno skromnim mogućnostima. Jedan je od načina već prije opisan s tzv. ultrazvučnom impulsno-širinskom modulacijom (sl. 106).

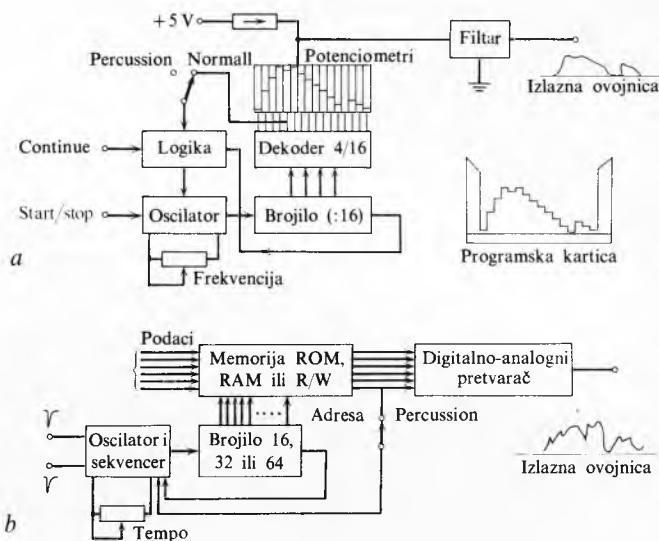


Sl. 106. Sklop za oblikovanje ovojnice

Mnogo bolji rezultati mogu se postići generatorima ovojnice digitalne izvedbe (sl. 107a). Na ulazu se nalazi start—stop oscilator načinjen pomoću integriranog sklopa, koji počinje oscilirati pri dovođenju negativnog impulsa na ulaz, a zaustavlja se također negativnim impulsom. Frekvencija oscilatora može se mijenjati potencijetrom. Pritiskom na tipku klavijature pobuđuje se oscilator takta, što daje takt 16-bitnom broju koje preko dekodera 4/16 određuje iz kojeg će od grupe potencijetara biti prosljeđen napon na izlaz, a iz kojeg se filtriranjem dobiva ovojnica. Logički je sklop tako namješten da, kad se pritisne tipka oscilatora, prvih pet impulsa oblikuju vrijeme porasta. Uz pritisnutu tipku izlaz dekodera je stalno na petom potencijetru. Otpuštanjem tipke nastavlja se proces stacionarnog stanja i opadanja tona.

Trajanje ovojnice određeno je frekvencijom oscilatora, a oblik položajem potencijetara. Logički sklop zaustavlja osciliranje nakon 16 impulsa ako na ulazu nije određeno drugačije. Npr. oznaka continue označuje ponavljanje tona, mandolinski efekt itd. Jednostavno pamćenje ovojnice naređuje se s plastičnom karticom s izrezom koji označuje položaj potencijetara.

U nešto složenijem sklopu (sl. 107b), koji radi na istom principu, umjesto potencijetara primijenjene su memorije u kojima je digitalno upisan niz binarnih brojeva što odgovaraju amplitudama ovojnice u času uzimanja uzoraka. Za eksperimentiranje upotrebljava se čita—piše memorija (engl. Read—Write, R—W) ili obostrano dostupna memorija, tj. u koju se piše i iz koje se čita (engl. Random Acces Memory, RAM), a za neposredno izvođenje ispisna memorija, iz koje se samo čita (engl. Read Only Memory, ROM; v. *Impulsna i digitalna tehnika*, TE 6, str. 463).



Sl. 107. Digitalni generator ovojnice: a jednostavniji, b složeniji tip

Ti se digitalni podaci, kojih u jednom trajanju tona može biti 16, 32 ili 64, dovode u digitalno-analogni pretvarač gdje se na njegovu izlazu može dobiti složena ovojnica. Ti su sklopovi pogodni za velike studije elektroničke glazbe.

Kao izvor ovojnice može se upotrijebiti bilo koje glazbalo ili neka druga zvučna pojava, pomoću slijedila ovojnice koje ovojnicu na ulazu pretvara u razmjernu promjenu izlaznog napona. Ovojnica se može generirati i računalom.

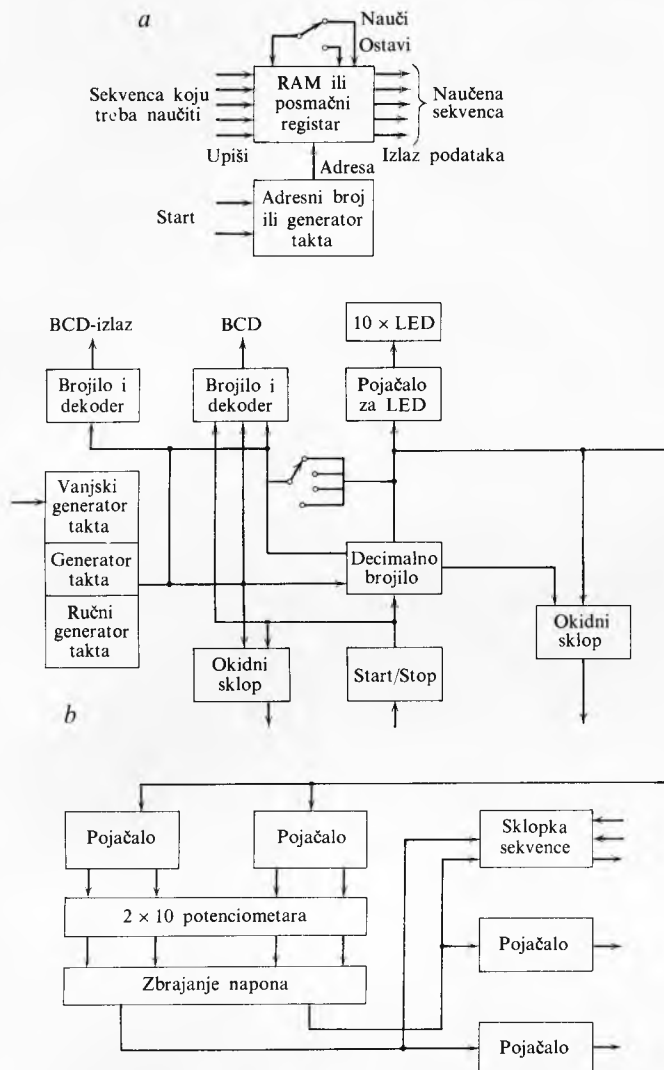
Sekvencer je sklop koji može memorirati niz različitih vrijednosti napona, a poslije ih reproducirati različitim brzinama. Ti su naponi upravljačke veličine za naponski upravljane jedinice, a ujedno odgovaraju naponima koje daje klavijatura kao izvor upravljačkog napona.

Prvi su sekvenceri bili izvedeni od niza potencijetara s kojih su naponi odvođeni na naponski upravljane jedinice. To se još primjenjuje, ali u veoma poboljšanoj izvedbi.

Drugi tip sekvencera, koji se upotrebljava pri neposrednim izvedbama, nije izveden s potencijetrima, već pamti određenu glazbenu sekvencu odsviranu na klavijaturi. Može se reproducirati bilo koliko puta i s promjenljivom brzinom.

Prema načinu obradbe signala razlikuju se analogni i digitalni sekvenceri. Analogni sekvencer s potencijetarskom matricom može imati ograničeni broj potencijetara. Digitalni sekvencer umjesto potencijetara ima memoriju RAM, zbog čega mu je veoma povećana brzina rada i duljina sekvence (sl. 108a).

Iako najčešće sekvencer upravlja s naponskim upravljanim oscilatorom, on može upravljati i sa sve tri upravljane jedinice i još s naponski upravljanim pojačalom i filtrom. U sekvenceru se nalazi i izlaz s okidnim impulsima za pobuđivanje generatora ovojnice ili za sinhroniziranje nekog drugog paralelno spojenog sekvencera.

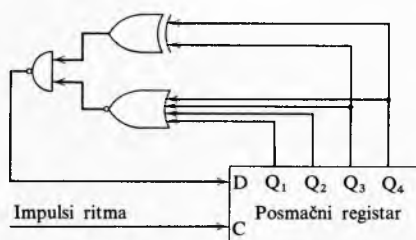


Sl. 108. Digitalni sekvenceri: a s memorijom RAM, b sa 20 potencijometara

Na sl. 108b vidi se blok-shema sekvencera sa 20 potencijometara.

Generator slučajnih sekvenci. U elektroničkoj glazbi često se primjenjuje generator za dobivanje tonova slučajne visine odabranog trajanja, ili za tonove slučajne visine i slučajnog trajanja. Može se izvesti na različite načine. Ako je izveden kao generator slučajnih signala, tada je na izvor niskofrekvencijskog šuma priključen Schmittov okidač. Takav se signal može dovesti na sklop za deriviranje i dalje na prstenasto brojilo. Iz brojila se može paralelno uzimati podatak koji se preko digitalno-analognog pretvarača dovodi u naponski upravljani oscilator (sl. 109).

Na izvor niskofrekvencijskog šuma i nekog drugog signala može se spojiti sklop za uzorkovanje (engl. Sample and Hold), koji se može okidati nekim određenim ritmom ili prije opisanim signalom iz derivatora. Na izlazu sklopa za uzorkovanje



Sl. 109. Generator slučajnih signala

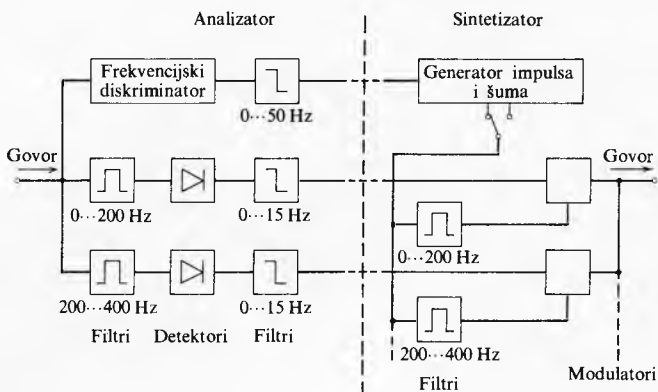
dobit će se niz slučajnih napona za upravljanje naponski upravljanim oscilatorom ili nekim drugim naponski kontroliranim sklopom. Digitalni generator pseudoslučajnih sekvenci može se dobiti pomoću posmačnih registara, te nizom logičkih vrata ILI, NILI i I. Paralelno očitano logičko stanje registra može se preko digitalno-analognog pretvarača dovesti na naponski upravljani oscilator.

U sklopu sintetizatora nalazi se gotovo uvijek generator vrlo niskih frekvencija ($2 \dots 20$ Hz) koji služi za dobivanje vibrata, odnosno tremola.

Sklop za uzorkovanje. Poželjno je imati u sustavu sintetizatora sklop koji radi kao analogna memorija i koji se upotrebljava kad je za dulje vrijeme potreban konstantan upravljački napon. Ti sklopovi kroz određeno razdoblje uzimaju uzorak promjenljivog napona, da bi ga nakon tog razdoblja zapamtili. Sklop za uzorkovanje propušta ulazni napon dok na njegovu ulazu traje logička naredba *sample*. Kada naredba promijeni stanje u *hold*, na izlazu ostane zapamćena trenutna vrijednost ulaznog napona, zatečena u trenutku promjene stanja iz *sample* u *hold*. Takvi se sklopovi izvode s linearnim integriranim sklopovima i RC mrežom.

Vokoder (engl. Voice Coder) je sklop koji se izvodi kao poseban uređaj. Danas postoji čitav niz rješenja za pojedine podsklopove vokodera, a osnovna mu je namjena analiza i sinteza ljudskog glasa. Uređaj se sastoji od analizatora i sintetizatora govora. Analizator slijedi spore glasovne promjene koje unose informacije i kodira ih. Preko prijenosnog sustava ti podaci dolaze na sintetizator koji rekonstruira govor sa svim njegovim značajkama, već prema zahtjevu.

U kanalnom vokoderu (sl. 110) govorni signal iz mikrofona dolazi na filtre, gdje se filtrira na 16 područja širine 200 Hz, a poslije ispravljanja ostaju samo spore promjene amplitude propuštenog signala. Dovoljni su informacijski kanali propusne širine 15 Hz jer se obično ne izgovara više od 12 glasova u sekundi. Istodobno se diskriminatorom i mjerачem frekvencija prate promjene osnovne frekvencije glasa. One se prenose kroz filter šireg područja (50 Hz) da se ne bi prekinulo uključivanje prijenosne frekvencije u sintetizatoru. Kad nema prijenosne frekvencije, u sintetizatoru je uključen generator šuma.



Sl. 110. Kanalni vokoder

Zapravo sintetizator radi kao govorni organ, a amplitude signala poslije pojedinih filtera određuje modulator. Tako je načinjeno zbog ekonomičnosti prijenosa, pa se umjesto kanalom širine 3200 Hz, koliko je potrebno za telefonski kanal, veza između analizatora i sintetizatora postiže kanalom širine 16×15 Hz i još 50 Hz, za prijenosnu frekvenciju, dakle ukupno kanalom širine 290 Hz. Za vokoder s digitalnim prijenosom potrebno je još uže područje. Vokoder analizira ljudski glas, mijenja mu osnovne parametre i dodaje nove, te ga na osnovi tih izmjena sintetizira. Nastao je u prvom redu radi govornog glasa, međutim, u elektroničkoj se glazbi kao ulazni signali upotrebljavaju i drugi signali, već prema načinu rada vokodera.

Neke od primjena vokodera na tom području jesu: proučavanje svojstva glasa, prijenos govora, transpozicija govora i stvaranje različitih zvučnih efekata.

Najvažniji efekti jesu: transpozicija odsvirane ili otpjevane sekvencije po želji dodanim vibratom ili posebnom melodijom, postizanje jednoglasnih ili višeglasnih glasova glazbala, zamjena jednog glasa drugim (višeglasno pjevanje ili izgovaranje teksta), dodavanje glasovima neharmonijskih nadvalova, artikulacije prirodnih zvukova i šumova (izvor upravljačkog napona za druge uređaje, npr. sintetizator), promjena u višestrukum filtru itd.

Senzorski generator. Dinamički izvori upravljačkih napona sintetizatora ne zadovoljavaju pri prijenosu informacija. Tendencija je da se što više upotrebljavaju oni izvori koji se mogu programirati, a to su oni načinjeni u digitalnoj, odnosno računarskoj tehnici.

Pri sviranju klasičnih glazbala postoje veće mogućnosti kontroliranja dinamike i nastajanja tona. Npr. na gudačkim se glazbalima može izvesti lijevom rukom vibrato, glisando, portamento i tremolo, dok desna ruka izvodi čitav niz različitih dinamika, nastajanje tona, već prema tome kako se povlači gudačo, kojom se silom pritišće i na kojem se mjestu vuče. Tu treba svakako dodati i staccato koji se izvodi s različitim dinamičkim gradacijama. Isto to vrijedi i za glasovir. U elektroničkim glazbalima, osim u iznimnim slučajevima, ne postoji dinamičko djelovanje prstiju na tipke. Da bi se taj nedostatak smanjio, izrađuju se klavijature na kojima može doći do izražaja rad prstiju.

Na osnovi elektromehaničkih analogija izvedeni su modeli prsta, a iz njih sklopovi koji omogućuju dinamičko i tonsko djelovanje prsta na tipke.

Postoje i drugi načini dobivanja upravljačkog napona pomoću kojeg se može regulirati dinamika. Poznat je upravljač s vrpcom koji je dodimo-senzitivnog tipa. Takvim izvorom upravljačkog napona moguće je odsvirati glisando preko pet oktava. Vrlo često se upotrebljavaju zvučni upravljači (tzv. Yoy Stick) za dvodimenzijno upravljanje zvukom.

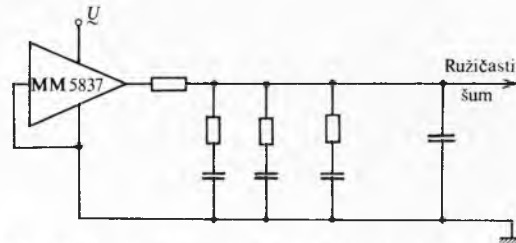
Stupanj s eksponencijalnom prijenosnom funkcijom. Taj se stupanj upotrebljava kao dodatak naponski upravljanim stupnjevima, a uvjetovan je posebnim karakterom slušnog osjeta. Između frekvencije i visine tona, te jakosti zvučnog tlaka i glasnoće, tj. između subjektivnih i objektivnih veličina, postoje približno logaritamski odnosi. U naponski upravljanim stupnjevima vlada linearna ovisnost frekvencije ili pojačanja prema upravljačkom naponu. To znači da jednake promjene upravljačkih napona ne daju jednaku promjenu glasnoće, odnosno visine. Da bi se taj nedostatak uklonio, stavljaju se između izvora upravljačkog napona i naponski upravljanih stupnjeva sklopovi s eksponencijalnom prijenosnom funkcijom koja pretvara linearnu promjenu u eksponencijalnu.

Izvori šuma. Šum je nepravilno titranje u kojemu nema ni stalnih frekvencija, ni stalnih amplituda. Spektr šuma nije linijski nego je kontinuiran. U sintetizatorima se upotrebljavaju najčešće izvori šuma: bijeli šum, ružičasti šum i šum vrlo niskih frekvencija. U bijelom šumu (dobio je naziv prema analogiji s bijelim svjetlom) sve su komponente približno jednakog intenziteta i raspoređene po cijelom čujnom području. Bijeli šum ima jednoliko raspodijeljenu energiju po jedinici širine pojasa, npr. po jednom hercu, što znači da mu amplituda raste 3 dB po oktavi. Izvori obojenog šuma mogu se dobiti pomoću različitih filtarskih kombinacija (npr. lepezastog filtra). Ružičasti šum ima jednaku energiju unutar određenog frekventijskog intervala, npr. oktave, i ima horizontalnu amplitudnu

karakteristiku. Ružičasti šum može se dobiti iz bijelog šuma pomoću filtra koji guši 3 dB po oktavi. Na sl. 111 prikazane su frekventijske karakteristike bijelog i ružičastog šuma.

Šum veoma niskih frekvencija dobiva se kao i obojeni šum iz bijelog šuma pomoću više niskopropusnih filtara.

Generatori šuma mogu biti načinjeni u analognoj tehnici posebno odabranim diodama i tranzistorima, a u digitalnoj tehnici pomoću posebnih integriranih sklopova kao generatora pseudo-slučajnih sekvenci (sl. 112).



Sl. 112. Generator ružičastog šuma s integriranim sklopom

Isto tako kao što i generatori ovojnice upotrebljavaju osim elektroničkih izvora ovojnice i one dobivene klasičnim glazbalima, tako se kao izvori primjenjuju i drugi posebno snimljeni, prirodni i umjetni šumovi, odnosno buka (šuštanje lišća na vjetru, prometna i gradska buka, itd.).

Elektronička računala i elektronička glazba

Elektronička digitalna računala ili pojedini njihovi stupnjevi upotrebljavaju se i za elektroničku proizvodnju ili obradu zvuka (v. *Digitalna računala*, TE 3, str. 313; v. *Računarska tehnika*).

Za glazbenu primjenu računala posebno je važna brzina izvođenja instrukcija, i to u velikim sustavima računala koja rade sa simulacijskim jezicima radi mnogih naredbi, i u mikroprocesorima koji generiraju signale radi upravljanja analognim sustavom sintetizatora zvuka.

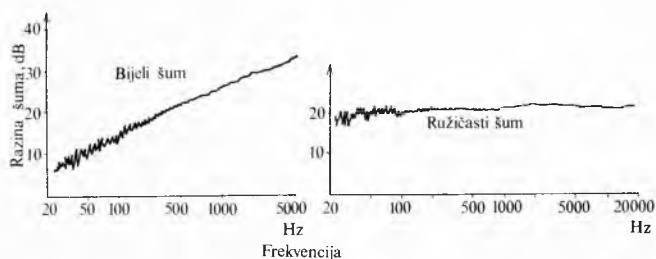
Brzine su izvođenja instrukcija različite i ovise o izvedbi računala. Za primjenu digitalnih računala u sustavu sintetizatora zvuka važno je povezivanje s vanjskim stupnjevima. Tu je još važno i mikroprogramiranje koje omogućuje samostalno definiranje instrukcija. Zbog toga su mikroprocesori veoma prikladni za primjenu u elektroničkim glazbalima. Procesor je sklop koji uzima instrukcije iz memorije, protumači ih i izvodi sve potrebne radnje za izvršenje naredbe. Mikroprocesor je procesor izveden u tehnologiji LSI u jednom ili više čipova. Mikroprocesor se sastoji od sljedećih stupnjeva: središnjeg procesorskog stupnja (engl. Central Processing Unit, CPU), memorije ROM i memorije RAM. Tome se dodaje još jedan LSI-element: ulazno-izlazna veza (Peripherie Interface Adapter, PIA; v. *Impulsna i digitalna tehnika*, Te 6, str. 469).

Mikroprocesor je nastao zahvaljujući tehnologiji MOS koja dozvoljava visok stupanj integracije, ali je ona bila i uzrokom male brzine rada ($10 \cdots 12 \mu\text{s}$). Npr. računalo izvedeno u TTL-logici za jedan ciklus treba $1 \cdots 1,2 \mu\text{s}$. U N-kanalnom mikroprocesoru MOS postignuto je trajanje ciklusa od samo $\sim 2 \mu\text{s}$.

Sklopovi za povezivanje digitalnih računala, odnosno mikroprocesora s vanjskim stupnjevima jesu digitalno-analogni (DAC) i analogni digitalni pretvarači (ADC).

Primjena računala. Digitalno računalo, odnosno mikroprocesor može se primijeniti u elektroničkim glazbalima na više načina (pri tom treba razlikovati upotrebu računala od upotrebe mikroprocesora):

a) kao *upravljački stupanj* koji koordinira rad svih ostalih stupnjeva, određuje smjer i vrijeme prenošenja podataka (upravljačkog ili tonskog signala, digitalnog ili analognog) i određuje način rada pojedinih stupnjeva (generatora ili procesora upravljačkog ili tonskog signala); b) kao *generator upravljačkog signala*, uglavnom digitalnog, a po potrebi pretvorenog u analogni koji može služiti kao upravljački signal za naponski



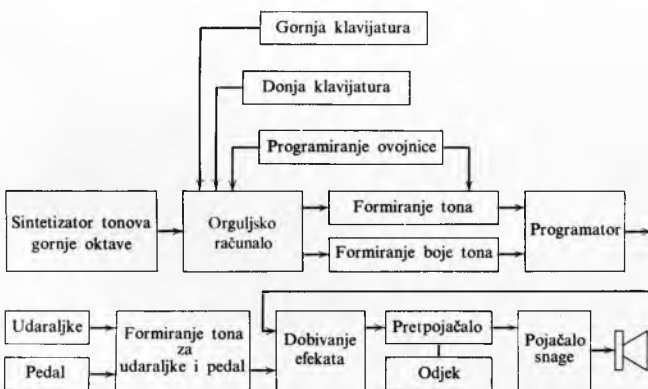
Sl. 111. Frekventijske karakteristike bijelog i ružičastog šuma

upravljane sklopove; c) kao *generator zvučnog signala* određenog valnog oblika što ga generira kao digitalne vrijednosti uzoraka s određenim ritmom uzorkovanja; te se vrijednosti pretvaraju u analogne tako da se propuste kroz niskopropusni filter, što daje konačni oblik tonskog signala; d) kao *procesor upravljačkog signala*, tj. sklop koji će prema zahtjevima modificirati parametre nekog drugog upravljačkog signala; e) kao *procesor zvučnog signala* kojemu se parametri unose u digitalnom obliku u sustav računala ili mikroprocesora, gdje se oblikuju i služe za sintezu novog zvučnog signala; f) kao *kompletni sustav za sintezu zvuka* koji se simulira na velikom računalu pomoću simulacijskih jezika.

Primjena mikroprocesora. Zahvaljujući velikom interesu za gradnju orgulja udružili su se mnogi proizvođači elektroničkih orgulja s proizvođačima integriranih sklopova. Rezultat je toga velika primjena mikroprocesora u elektroničkim orguljama. Već dosta dugo izrađuju se sklopovi za ritam u jednom integriranom sklopu, zatim tzv. sintetizatori gornje oktave, djelitelji frekvencija, stupnjevi za kašnjenje itd.

Tvrtka Dr Böhm proizvela je digitalne orgulje Top-Sound DS, kojima je upotrebom integriranih sklopova i mikroprocesora mnogo smanjena cijena i pojednostavnjena gradnja. Osobitost je tih orgulja mikroprocesor kao središnji upravljački stupanj, ostvaren u samo jednom integriranom sklopu.

Za svaku tipku klavijature upotrijebljen je samo po jedan kontakt. Ispod klavijature nalazi se paralelno-serijski sklop za povezivanje, dakle samo jedan posmačni registar koji dobiva takt iz procesora (Orgel-Computer). Oko tisuću puta u sekundi provjerava se svaki kontakt klavijature. Informacija ide dalje u serijskom obliku preko sabirnice za 1 bit, dakle jednog jedinog voda, u procesor. Procesor na osnovi programa stvara logičke veze sa dvanaest tonova koje dobiva iz sintetizatora najviše oktave i stvara ton koji odgovara pritisnutoj tipci. Blok-shema orgulja vidi se na sl. 113.



Sl. 113. Blok-shema elektroničkih orgulja u izvedbi tvrtke Dr. Böhm

Za generator tona upotrijebljen je oscilator velike stabilnosti koji daje signal frekvencije 2 MHz. Taj se fazno uspoređuje s izlazom iz sintetizatora najviše oktave. Fazni detektor daje napon za upravljanje oscilatorom i tako se poništi fazna (i frekvenzijska) razlika.

ELEKTRONIČKO SNIMANJE I REPRODUCIRANJE GLAZBE

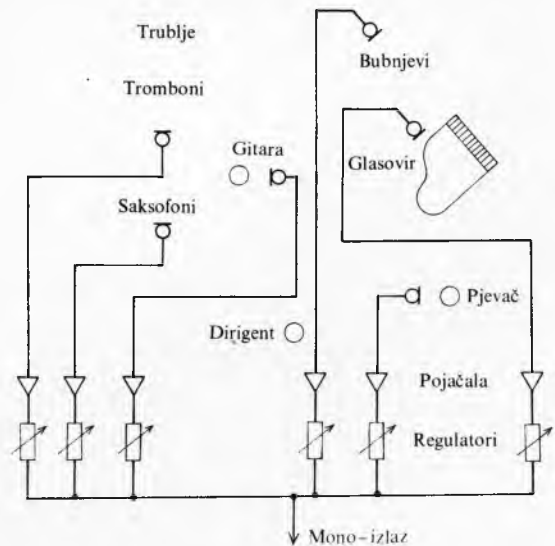
Snimanjem zvuka naziva se svaki postupak zapisivanja zvuka, tako da se nakon nekog vremena može ponovno reproducirati. Taj naziv ima i šire značenje. Prvo snimanje je izvedeno kad se zvuk primljen mikrofonom pretvori u električni signal, a drugo kad se radi pohranjivanja pretvara u signal sasvim druge prirode (gramofonska ploča, kinematografski film, magnetofonska vrpca). Danas se primjenjuju tri osnovna postupka snimanja: mehaničko, optičko i magnetsko snimanje. Svi postupci mogu biti analogni ili digitalni.

Reproduciranjem se dobiva zvuk na istom ili na bilo kojem drugom mjestu, istodobno ili u neko drugo vrijeme. Pri tom se

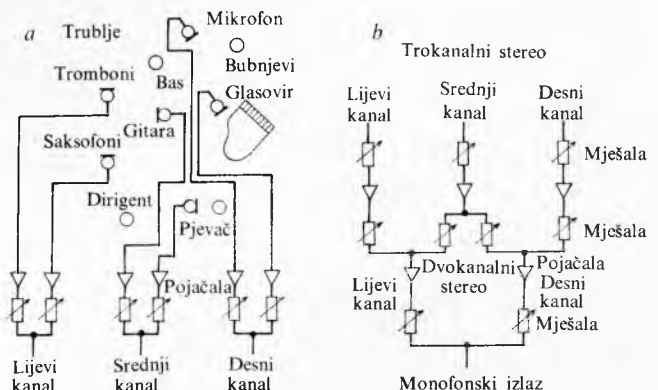
zapisani signali pretvaraju u zvuk pomoću elektroakustičkog uređaja za reprodukciju.

Snimanje zvuka

Od početka električnog snimanja sredinom dvadesetih godina našeg stoljeća pa sve do pojave magnetskog snimanja poslije drugoga svjetskog rata snimalo se urezivanjem tonskog zapisa na ploču koja se poslije upotrebljavala kao matrica u postupku proizvodnje gramofonskih ploča. Snimalo se s jednim mikrofonom koji se postavljao na takvu udaljenost od orkestra što je osiguravala optimalnu zvučnu uravnoteženost svih glazbala. Zatim se snimalo s nekoliko mikrofona (sl. 114), za što su prikladni mikrofoni s usmjernim karakteristikama, jer akustički odvajaju pojedina glazbala unutar orkestra. Sredinom pedesetih godina konstruiran je trokanalni magnetofon, te se počela primjenjivati stereofonska reprodukcija zvuka. Na sl. 115 prikazana je osnovna postava glazbala, pjevača i mikrofona koja se primjenjivala prilikom trokanalnoga stereofonskog snimanja. Naknadnim miješanjem moglo se prijeći s trokanalne stereofonske snimke na dvokanalnu, ili pak na monofonsku snimku. Razvoj i proizvodnja 8-, 16-, 24- i 32-kanalnih magnetofona omogućili su snimanje svakog izvođača posebno (sl. 116). Tako se solist može snimati odvojeno, a i pojedine skupine glazbala mogu se snimati u različito vrijeme. Druga je prednost da se glazbala i glasovi ne moraju uravnotežavati u toku snimanja. Nakon snimanja, iz 16 i više kanala može se dobiti kvadrofonska, stereofonska ili monofonska snimka. U tom se postupku, međutim, utroši mnogo vremena pri miješanju radi dobivanja kvalitetne

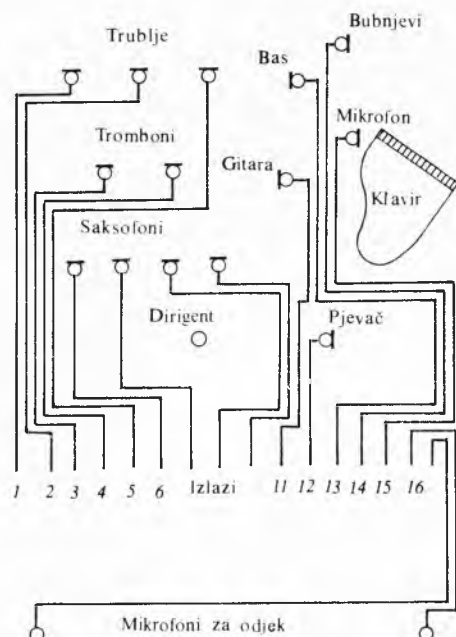


Sl. 114. Postava glazbala, pjevača i mikrofona za jednokanalno snimanje orkestra

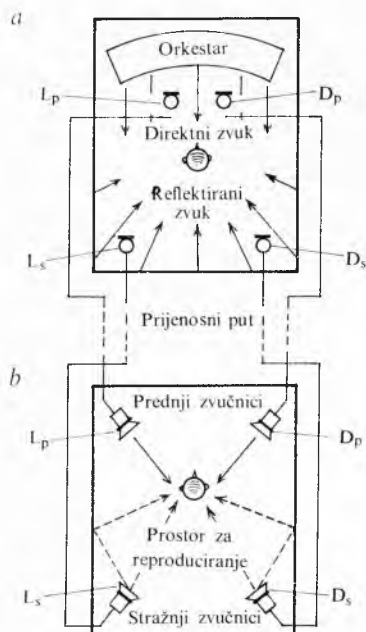


Sl. 115. Postava glazbala, pjevača i mikrofona za stereofonsko snimanje na tri kanala (a) i prijelaz s trokanalne stereofonske snimke na dvokanalnu te na monofonsku snimku (b)

konačne snimke. Pri višekanalnom snimanju veoma je važno da je preslušavanje između glazbala što manje. To se postiže upotrebom mikrofona s veoma usmjerenim karakteristikama i odjeljivanjem glazbala zaslonom, pregradom ili kabinom.

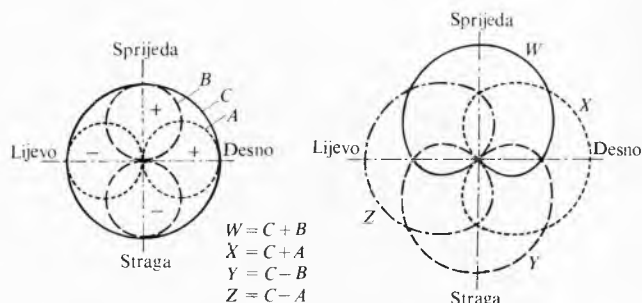


Sl. 116. Postava glazbala, pjevača i mikrofona pri višekanalnom snimanju



Sl. 117. Postava mikrofona i zvučnika pri kvadrofonskom snimanju (a) i reproduciranju (b). L_p i L_s lijevi prednji, odnosno stražnji, D_p i D_s desni prednji, odnosno stražnji mikrofoni ili zvučnici

Pri kvadrofonskom snimanju mogu se upotrebljavati prostorno raspoređeni mikrofoni (sl. 117) ili koincidentni mikrofoni. Pri tom su mikrofoni tako raspoređeni da kašnjenje između direktnog zvuka i prvih refleksija reflektiranog zvuka nije veće od 30–35 ms. Koincidentni kvadrofonski mikrofoni mogu se izvesti upotrebom triju mikrofona, jednog s kružnom karakteristikom i dva mikrofona s osmičastim karakteristikama (sl. 118a) što je zapravo proširena MS (njem. Mitte—Seite) stereofonija. Takav je mikrofoni veoma pogodan za vanjska snimanja.



Sl. 118. Usmjerne karakteristike mikrofona u horizontalnoj ravni. a mikrofoni A i B s osmičastom i mikrofoni C s kružnom karakteristikom, b tri mikrofona s kardioidnim karakteristikama

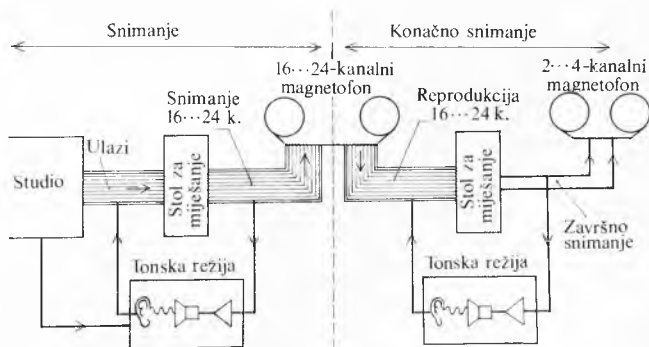
Kvadrofonski koincidentni mikrofoni mogu predstavljati i četiri posebna mikrofona međusobno približena i postavljena pod kutom od 90° između osi. Takva se postava često upotrebljava za kružna snimanja, tj. mikrofoni se nalaze u središtu kružnice koju čine izvodači. Kod postave s koincidentnim mikrofonom upotrebljavaju se mikrofoni s kardioidnim karakteristikama (sl. 118b), ili mikrofoni s kombinacijom osmičastih ili kardioidnih karakteristika. Pri snimanju s prostorno raspoređenim mikrofonom upotrebljavaju se mikrofoni s osmičastom i kardioidnom karakteristikom.

Kvadrofonska snimka uz sva svojstva koja se postižu stereofonskom snimkom daje i podatke o prostornoj raspodjeli zvuka u koncertnoj dvorani, dakle o akustičkom ambijentu.

Međutim, ako se izuzme dobivanje veće realističnosti, kvadrofoni postaje i važan postupak za stvaranje nove zvučne slike.

Sve veća upotreba digitalne tehnike odrazila se i u tonfrekvencijskoj tehnici. Danas se proizvode digitalni magnetofoni i gramofoni, zatim različiti digitalni uređaji za obradu glazbenog signala. Sve to dovodi do povećanja kvalitete, stvaranja novog zvuka, ali ujedno donosi i posebne probleme i ograničenja koja su vezana za tehnološka dostignuća digitalnih sklopova.

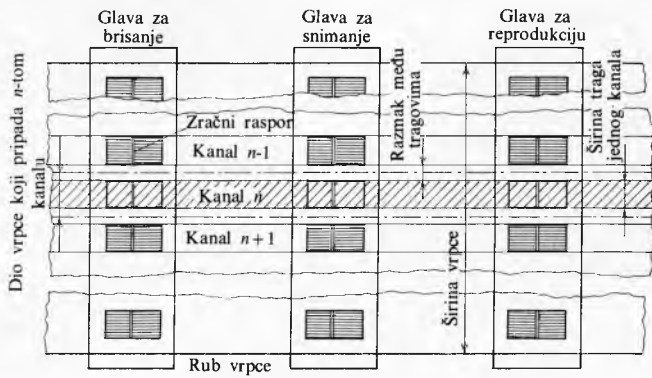
Višekanalno snimanje je zapisivanje više zvučnih signala na magnetofonsku vrpce, pri čemu postoji mogućnost neovisnog brisanja, snimanja ili reproduciranja svakog signala, ali uz zadržanu međusobnu sinhronizaciju. Cijeli postupak od neposrednog snimanja u studiju do ostvarenja konačne monofonske, stereofonske ili kvadrofonske snimke sastoji se u osnovi od snimanja i konačnog miješanja (sl. 119). Svakom signalu pripada određeni kanal označen brojem i time je određen položaj kanala i pripadnih glava za brisanje, snimanje i reprodukciju na širini magnetofonske vrpce, te pripadajuća pojačala sa svim regulatorima i preklopnima.



Sl. 119. Shema višekanalnog snimanja i miješanja

Višekanalne glave za brisanje, snimanje i reprodukciju smještene su tako da leže na jednakim međusobnim razmacima po širini vrpce, i to točno jedna iznad druge na pravcu okomitom na smjer kretanja vrpce (sl. 120). To je osnovni uvjet za sinhronizaciju svih kanala.

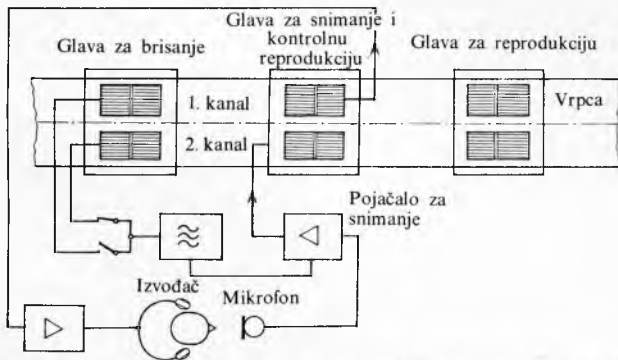
Svaki višekanalni magnetofon može se upotrijebiti za snimanje neovisnih informacija. Međutim, osnovna primjena takva



Sl. 120. Raspored kanala na višekanalnoj magnetofonskoj vrpici

uređaja jest snimanje, pri kojem je svaki kanal samo dio neke složene zvučne slike koja se može dobiti miješanjem pojedinih kanala. Upravo je takvo i višekanalno snimanje glazbe. Pojedina glazbala ili skupine glazbala snimaju se za vrijeme glazbene izvedbe na različite kanale. Pri reprodukciji toni zapisani u tim kanalima miješaju se na tonskom stolu i na određeni se način oblikuju u uređajima za naknadnu tonsku obradu (filtri, ekvilizatori, kompresori, limiteri, uređaji za promjenu faze, linija za kašnjenje, odjek, potiskivanje šuma itd.), te se snimaju kao monofonski, stereofonski ili kvadrofonski zapis. Gotov zapis može se upotrijebiti kao televizijski ton (jedan kanal), ton radija (jedan ili dva kanala), filmski ton (šest kanala), za snimanje gramofonskih ploča ili magnetofonskih vrpca (jedan, dva ili četiri kanala), već prema tome da li je to monofonska, stereofonska ili kvadrofonska reprodukcija. Proces konačnog miješanja u kojemu se dobiva konačna snimka vrlo je složen. Upravo mogućnost neograničenog ponavljanja omogućuje dobivanje tehnički i glazbeno vrlo kvalitetnih snimki, bez prisutnosti izvođača, koji su svoj dio posla završili onog časa kad su svi kanali ispravno snimljeni.

Višekanalni magnetofon. Princip rada višekanalnog magnetofona može se promatrati na dvokanalnom magnetofonu. To je magnetofon sa tri glave: za brisanje, za snimanje i za reprodukciju. Svaka glava je dvostruka, tako da svakom kanalu pripada pola širine vrpce, te postoji mogućnost neovisnog brisanja, snimanja i reprodukcije jednog i drugog kanala. Da bi se postigla sinhronizacija zapisa pri naknadnom dodavanju tonskog signala na drugi kanal, glava za snimanje prvog kanala treba da radi kao glava za kontrolnu reprodukciju (sl. 121). Ona tada daje tzv. sinhronizacijski signal, koji je doduše slabije tonske kvalitete nego signal iz glave za reprodukciju. To, međutim, nije važno, jer takav signal služi samo kao informacija vremena odvijanja već snimljenog kanala. Kako istodobno glava za snimanje prvog kanala zapisuje novi signal, to su dva signala uz vremensku istohodnost zapisana na istom mjestu vrpce i pri reprodukciji mogu se sinhrono očitati s glava za reprodukciju.

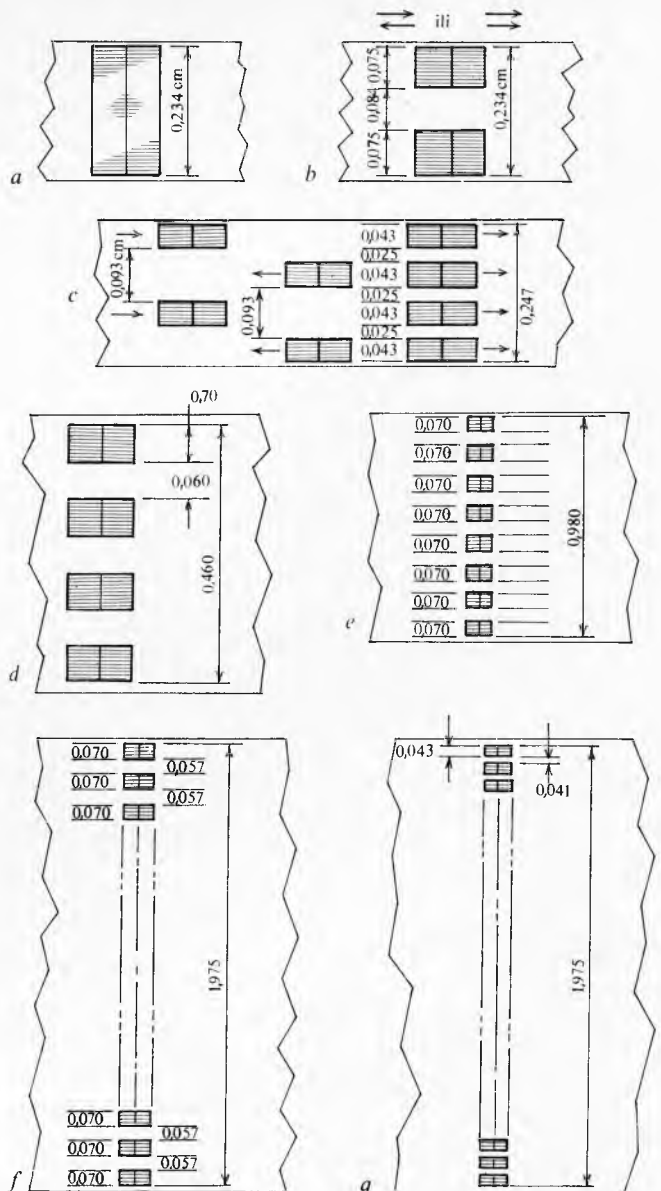


Sl. 121. Raspored magnetofonskih glava na vrpici dvokanalnog magnetofona

Razvoj višekanalnog snimanja. Potreba za višekanalnim magnetofonom javila se prije više desetaka godina u filmskoj ton-

skoj tehnici radi sinhroniziranja tekstova i zvučnih efekata pri tonskoj obradi filma. U gramofonskoj i radiofonskoj proizvodnji višekanalni magnetofon je omogućio naknadno dodavanje instrumentalnog ili vokalnog solista na osnovnu snimku instrumentalne grupe bez višekanalnog presnimanja. To je povoljnije jer su izbjegnuti šum i izobličjenje koji se pojavljuju pri višestrukom presnimanju; snimka ostaje u razloženom stanju sve do konačnog miješanja, pa je izbjegnuta mogućnost greške pri presnimanju i miješanju prije konačne snimke.

Četverokanalni magnetofon je potpuno zadovoljavao pri monofonskom snimanju. Međutim, pojava stereofonije, elektroničkih glazbala, kvalitetnijih kućnih uređaja (prijamnika, gramofona, magnetofona) te sve veći zahtjevi na kvalitetu glazbenog programa uvjetovali su dalji razvoj višekanalnih magnetofona. Broj kanala je povećan na 8 i 16, zatim na 24 i konačno na 32 kanala. Postoje i mogućnosti spajanja u paralelan rad dvaju 24- ili 32-kanalna magnetofona, tako da broj kanala nije ograničen. Dakle, ako pri snimanju originala nije osiguran dovoljan broj kanala jednim magnetofonom za sve potrebne elemente izvođenja, može se upotrijebiti još jedan 16-, 24- ili 32-kanalni magnetofon. Pri tom po jedan kanal na svakoj vrpici služi za digitalno vremensko kodiranje. Tako se



Sl. 122. Standardne širine tragova na magnetofonskim vrpčama. Vrpca širine 25 mm: a puni trag, b pola traga (jedan kanal dva puta ili dva kanala), c četvrtina traga (jedan kanal četiri puta, dva kanala dva puta ili četiri kanala). Vrpca širine 50 mm: d za četverokanalno, e za osamkanalno, f za 16-kanalno i g za 24-kanalno snimanje

sa dva 16-kanalna magnetofona može dobiti 30 posebnih glazbenih kanala, sa 24-kanalnim 46, a sa 32-kanalna magnetofona 62 kanala. Nisu, međutim, sva glazbena snimanja tako složena. Mnoga se još uvijek izvode odjedanput, tj. sve dionice se snimaju istodobno, ali se većinom snima višekanalno. Tako je omogućena obradba svakog kanala pri konačnom miješanju i ugađanje odnosa između glazbala. Povećanje broja kanala zahtijevalo je rješavanje mnogih drugih problema. Dio vrpce koji pripada pojedinom kanalu, dakle širina traga, stalno je smanjivan (sl. 122). Uz današnje standarde za širinu vrpce od 25 mm za magnetofone sa 16 kanala i 50 mm za magnetofone sa 16 i više kanala širina traga za 32-kanalni magnetofon iznosi ~1 mm. To je šest puta manje od širine traga monomagnetofona na vrpci od 6,35 mm. Upravo ta mala širina traga u višekanalnim magnetofonima veoma pogoršava omjer signala i šuma, pa je to uvjetovalo razvoj uređaja za smanjenje šuma vrpce.

Radi smanjenja akustičkog preslušavanja potrebna je dodatna akustička obradba studija, upotreba pregrada i novih vrsta mikrofona. Problem je u previši regulatora pri miješanju konačne snimke, što je dovelo do automatiziranja pojedinih funkcija tonskog stola. Tako je višekanalno snimanje postepeno poprimilo svoj današnji oblik i namjenu.

Uvođenje digitalnog prijenosa i registriranja tonskog signala (impulsna kodna modulacija, PCM) usmjeravat će dalji razvoj višekanalne tehnike, što će riješiti mnoge probleme: šum, dinamiku snimke i kolebanje visine tona. Uvest će se automatizacija većine funkcija tonskog stola pomoću mikroprocesora, što će dati još veću slobodu rada i mogućnost stvaranja kvalitetne konačne snimke.

Karakteristike uređaja. Višekanalni tonski lanac sastoji se od dva osnovna dijela: višekanalnog magnetofona i tonskog stola za miješanje za višekanalnu tehniku.

Suvremeni višekanalni magnetofoni optimalni su ako imaju najviše 24 kanala. Uz širinu vrpce od 50 mm i brzinu od 38 i 76 cm/s, takav magnetofon potpuno zadovoljava potrebe današnjih snimanja i po broju kanala i po kvaliteti. Magnetofon sa 16 kanala na vrpci od 50 mm ima nešto bolji omjer signala i šuma zbog veće širine tragova, ali je taj broj kanala premalen, posebno za primjenu automatizacije koja dodatno zauzima barem 2 kanala. Kod 32 kanala, na istoj širini vrpce, širina pojedinog traga postaje kritična, a time i kvaliteta i omjer signala i šuma, pa se takvi višekanalni magnetofoni izvode samo s brzinom od 76 cm/s. Povećana je brzina vrpce opravdana, jer se i uz manju širinu traga dobiva zadovoljavajuća kvaliteta.

Od dodatnih uređaja magnetofoni su opremljeni daljinskim upravljanjem s autolokatorom i memorijom, čime je omogućeno brzo i jednostavno pronalaženje pojedinih mjesta na vrpci.

Suvremeni n -kanalni stol za miješanje sastoji se od n ulaznih i izlaznih jedinica, n izlaza i od n monitorskih jedinica. Broj jedinica može biti i veći od n , međutim je potrebno da bude n neovisnih ulaza i izlaza. Postoje dva načina međusobnog smještaja tih jedinica. U početku je svaki skup jedinica bio poseban stol za miješanje, a stolovi su smješteni jedan do drugog. Noviji uređaji imaju samo jedan stol za miješanje gdje svakom kanalu pripada njegov ulazno-monitorski modul s oba regulatora smještena jedan iznad drugog. Ulazni dio tonskog stola s ulaznim regulatorom služi za upravljanje tonskim signalom od mikrofona do višekanalnog magnetofona. Monitorski dio služi za trenutno stvaranje jedne od mogućih tonskih slika glazbene izvedbe koja se snima. To je potrebno zbog toga što je vrlo teško pratiti pojedina glazbala ili skupine glazbala istodobno, ako su sva jednako, maksimalnog intenziteta kako se snimaju na višekanalnom magnetofonu, radi postizanja što boljeg omjera signala i šuma.

Na današnjim stolovima automatizirane su samo najvažnije funkcije: položaj glavnog regulatora, uključanje – isključivanje kanala, panoramski regulator, ali se taj broj stalno povećava.

Sastavni dio svakog višekanalnog tonskog lanca jesu i uređaji za smanjenje šuma, te uređaji za dodatnu obradbu tonskog signala.

Faze višekanalnog snimanja. Višekanalno snimanje glazbenog programa sastoji se od početnog snimanja osnovne grupe glazbala na određeni broj kanala, dosnimanja preostalih glazbala na slobodne kanale početne snimke i konačnog miješanja svih snimljenih kanala.

Početno snimanje. Obično se prvo snima grupa ritmičkih i harmonijskih glazbala, tako da svakom glazbalu pripada vlastiti kanal, odnosno složenom glazbalu (npr. bubanj) ili skupini glazbala pripada nekoliko kanala. Važno je da se ritmički instrumenti snimaju prvo zbog toga što je tako omogućena izvođačima lakša sinhronizacija i praćenje glavnog ritma i tempa u fazi dosnimanja. Ponekad se početno snimanje sastoji samo od snimanja metronoma na jedan kanal, pa se sva kasnija snimanja mogu smatrati dosnimanjem.

Budući da se sva glazbala početnog snimanja nalaze istodobno u tonskom studiju, to je njihovo međusobno akustičko preslušavanje veliki problem. Za višekanalno snimanje potrebni su studijski prostori s malim vremenom odjeka, jer tako brže opada zvučni tlak s vremenom i udaljenošću od nekog glazbala, te na mikrofone ostalih glazbala dolazi veoma oslabljen. Preslušavanje između kanala u uređaju vrlo je malo, 50–60 dB, pa akustičko preslušavanje među pojedinim glazbalima određuje njihovu međusobnu udaljenost, a time i čistoću i razumljivost konačne snimke. Ako to nije postignuto, tada u konačnom miješanju nije moguće mijenjati razinu pojedinog kanala a da se pri tom ne utječe i na ostala glazbala, pa višekanalno snimanje tada gubi svoj smisao. Akustičko preslušavanje između glazbala ne smije biti manje od 15 dB. Odjeljivanje se može povećati upotrebom zaslona, jakom usmjerenosti mikrofona i postavljanjem mikrofona blizu izvora, te pravilnim izborom glazbala koja se snimaju određenim postupkom. Treba izbjegavati da se pri početnom snimanju istodobno snimaju dva glazbala s velikom razlikom u intenzitetu, npr. bubanj i violina, jer tada svakako dolazi do akustičkog preslušavanja jačeg glazbala u kanalu slabijeg. Gdje god je to moguće, potrebno je elektronička glazbala priključiti izravno na ulaze tonskog stola.

Međusobno slušanje izvođača radi točnosti zajedničkog izvođenja u početnom snimanju nije kritično, jer se nalaze istodobno u istom prostoru, pa čuju direktan zvuk drugih glazbala. Problem nastaje ako je akustičko odjeljivanje veliko, zbog upotrebe kabina ili pregrada ili kad su elektronička glazbala priključena izravno na ulaz tonskog stola. Tada se upotrebljavaju slušalice u koje se, pomoću za to predviđenih izlaza tonskog stola, šalje trenutna tonska slika izvedbe, miješana na način koji daje maksimalnu međusobnu razumljivost pojedinih glazbala.

Ako tonski stol ima više neovisnih monitorskih izlaza, tada se može različitim izvođačima u slušalice poslati različite signale, već prema želji pojedinih izvođača. To omogućuje vlastitu kontrolu izvođenja i međusobno slušanje, što je osnovni uvjet za točan tempo, ritmičke i melodijske odnose, te živost glazbene izvedbe.

Pri početnom snimanju zapravo se ne upotrebljavaju tonski filteri u glavnom lancu: izvor zvuka, mikrofoni, ulazni modul, kanal na višekanalnom magnetofonu. Također se kod početnog snimanja ne dodaje umjetni odjek, već se pojedina glazbala snimaju relativno suho. Ponekad se pri tom snimanju upotrebljavaju limiteri i kompresori. Takvo snimanje potrebno je zbog toga što se ne može unaprijed odrediti konačna boja tona i odjek nekog glazbala. Krivom obradom signala kod početnog snimanja može nastati pogreška koja se kasnije ne može ispraviti. Već prije spomenuto paralelno monitorsko miješanje samo je kontrola da se svi kanali mogu uspješno miješati u konačnu snimku. Ako je to potrebno, signal se obrađuje i pri početnom snimanju.

Dosnimanje. Pri tom se snimanju na slobodne kanale dosnimaju ostali izvođači. To su obično grupe limenih i drvenih duhačkih glazbala, gudači, udaraljke, zbor, te solistička glazbala i pjevač. Snimljeni kanali služe za sinhronizaciju, što znači da su glave za brisanje tih kanala isključene, dok glave za snimanje rade kao glave za reprodukciju i daju sinhronizacijske tonske signale. Na pomoćnim ulazima i izlazima tonskog stola za naknadnu sinhronizaciju (engl. play-back) određeni se broj

kanala miješa i šalje u slušalice izvođača i služe mu kao podloga na koju on izvodi svoju dionicu. Na neki od slobodnih kanala snima se istodobno njegovo izvođenje. Kako je akustičko odjeljivanje mikrofona od izvođačevih slušalica vrlo veliko, nema preslušavanja s već snimljenih kanala. Dosnimanje višekanalnog snimanja može se ponavljati mnogo puta, a ograničeno je samo brojem kanala. Time je omogućeno posebno dosnimanje svakog glazbala bez akustičkog preslušavanja. Tada se mogu upotrebljavati pregrade samo za smanjenje vremena odjeka, tj. promjene prostorne akustike. Naime, ako su pri početnom snimanju zbog odjeljivanja upotrijebljeni zasloni, tada ih valja upotrijebiti i pri dosnimanju, bez obzira na to što akustičko odjeljivanje nije potrebno. Tako je zadržana ista akustika prostora kao i kod prvog snimanja. Unatoč malom vremenu odjeka današnjih studija i naknadnom dodavanju umjetnog odjeka, potrebno je već pri početnom snimanju i dosnimanju uskladiti tonske prostore pojedinih glazbala, jer su naknadne korekcije često nemoguće. Uklapanje glazbala koja se dosnimaju u tonsku sliku već snimljenih kanala kontrolira se istodobno sa snimanjem na monitorskom dijelu tonskog stola. Pri tom se upotrebljavaju svi uređaji za dodatnu obradu tonskog signala koji se upotrebljavaju i u konačnom miješanju. Tako se mogu odmah izvršiti sve potrebne korekcije boje, dinamike i prostora.

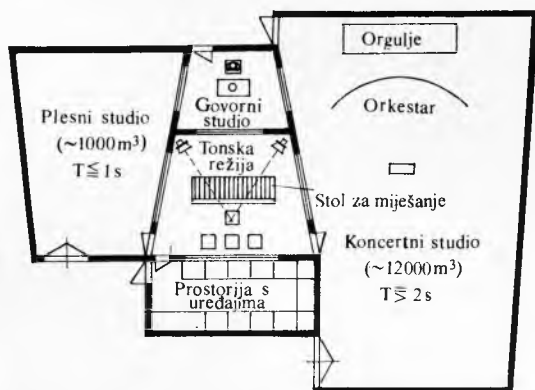
Konačno miješanje. Pri konačnom miješanju svi su snimljeni kanali višekanalnog magnetofona u funkciji reprodukcije. Tonski signal pojedinog kanala dolazi s glave za reprodukciju preko pojačala za reprodukciju na pripadni modul tonskog stola. Upotrebom uređaja za dodatnu obradu tonskog signala pojedini se kanali na određeni način mijenjaju i obrađuju i uz dodatak umjetnog odjeka, pomoću panoramskog regulatora i glavnih regulatora, raspoređuju se na konačnoj prostornoj, panoramskoj i intenzitetnoj tonskoj slici. Produkt konačnog miješanja je konačna monosnimka ili stereosnimka zapisana na magnetofonskoj vrpci u jednom, dva ili četiri traga.

Glazbeni studiji

U glazbenoj proizvodnji razlikuju se u pristupu obradbe glazbenog signala tzv. ozbiljna i zabavna glazba.

Ocjenjivanje kvalitete izvedbi izravnih prijenosa ili snimljenog zvuka većih orkestara ili zborova svrsishodno je samo onda ako su izvedene u prvoklasnim koncertnim dvoranama ili glazbenim studijima. Obujam takvih prostorija za takvu vrstu izvedbi treba biti veći od 10000 m³, a vrijeme odjeka 1...2 s.

Tradicionalna zabavna glazba (opereta i musical) može se izvoditi u sličnim prostorijama. Međutim, plesna glazba, pop-glazba, rock-glazba i jazz zahtijevaju prostorije s vremenom odjeka manjim od jedne sekunde, dakle studije obujma do najviše 1000 m³.



Sl. 123. Raspored prostorija i uređaja glazbenog studija

Tehničko-akustička i umjetnička dostignuća zahtijevaju tonske režije posebne veličine. Njihov obujam uz površinu 50...60 m² ne bi smio biti manji od 150 m³. Na sl. 123 prikazan je osnovni raspored prostorija za glazbenu proizvodnju.

Tonska režija nalazi se u sredini između koncertnog studija, studija za plesnu glazbu, govornog studija i prostorije s uređajima za snimanje.

Televizija, radio, film, gramofonske ploče i kasete stalno nas prate. Takva velika glazbena proizvodnja odrazila se i pri snimanju. Izvode se glazbena djela s velikim ansamblima i priznatim umjetnicima. Stoga se na glazbene studije postavljaju posebni tehnički zahtjevi. Prema tabl. 11 vidi se da se za snimanje postavljaju veoma različiti zahtjevi, koji ovise o vrsti snimke (jednokanalna monofonska snimka, višekanalna stereofonska snimka). Posebni zahtjevi postavljaju se i za prostorije u kojima se snimaju glazbene izvedbe.

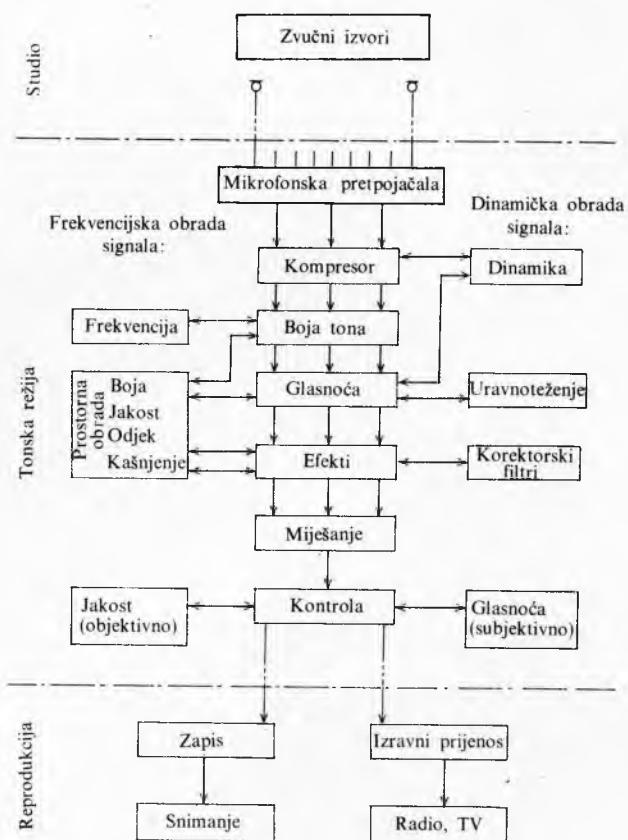
Tablica 11

BROJ KANALA ZA RAZLIČITA SREDSTVA PRIJENOSA

Sredstvo prijenosa	Broj kanala u snimci	Broj kanala pri reproduciranju	Načini snimanja
Ploče	2	2 ili 1	XY, MS
Kasete	2 (kvadro)	4	a-b-c-d
Radio	2	2 ili 1	XY, MS
Televizija	2	1 ili 2	XY, MS
Film	2 (standardni) 4 (Cinemascope) 6 (Todd-AO)	1 4 6	XY, MS a-b-c-d a-b-c-d-e-f

Stol za miješanje (tonska stol) je uređaj gdje se audiosignali dobiveni od mikrofona ili nekog drugog izvora (elektroničkih glazbala, magnetofona, gramofona) pojačavaju, miješaju, obrađuju i dovode na različite izlaze za snimanje za neki sustav prijenosa (radio, televizija, film) ili za ozvučenje. Najsloženiji stolovi za miješanje nalaze se u radio-televizijskim studijima, studijima za snimanje ploča i kasete, filmskim studijima i koncertnim dvoranama.

Na sl. 124 prikazan je proces snimanja i prijenosa zvuka za različite medije. Izlazni signal svakog studijskog mikrofona

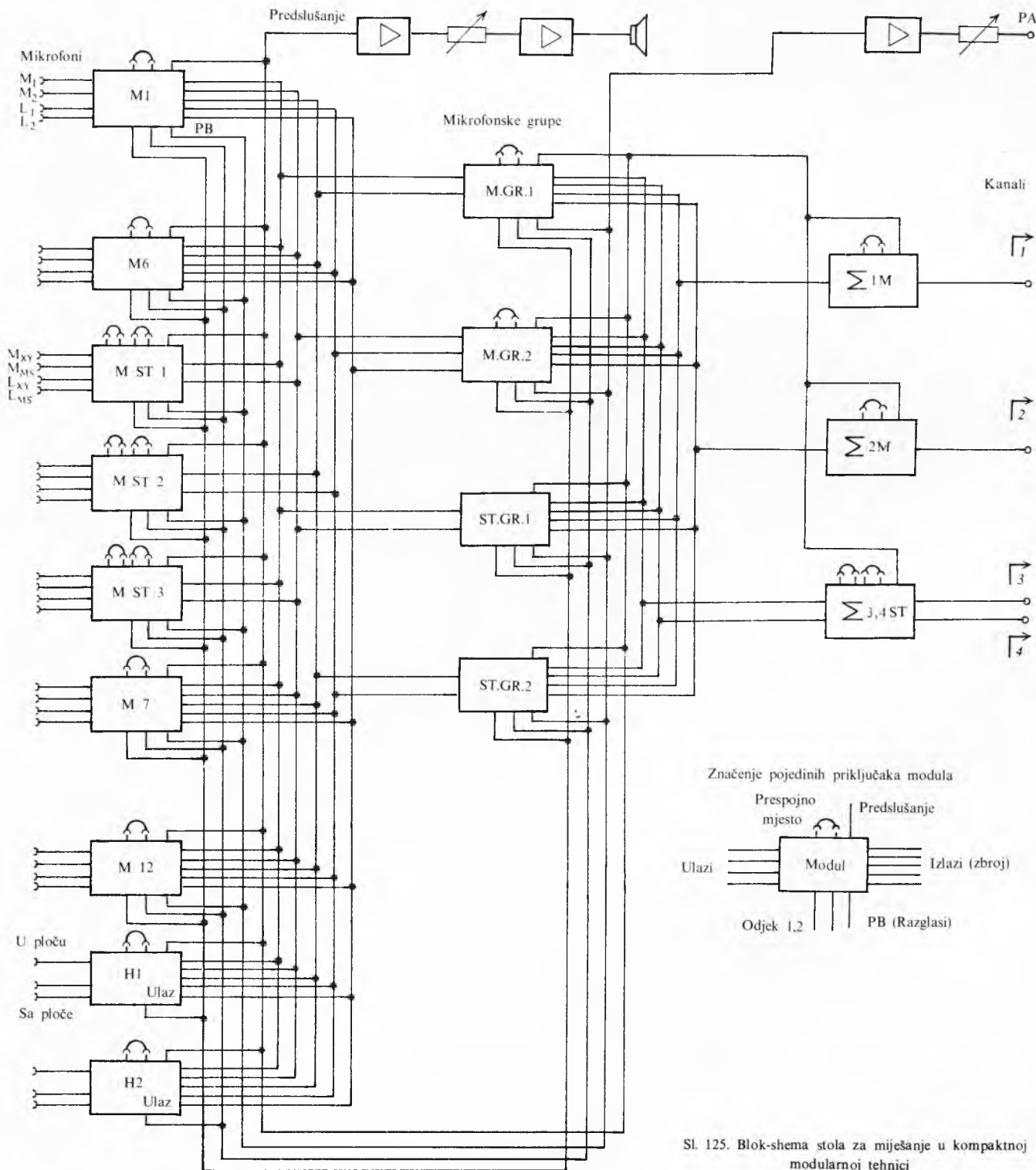


Sl. 124. Shema postupaka snimanja, režiranja i reproduciranja zvuka

mora se najprije pojačati. Svaki mikrofonski kanal ima svoje mikrofonsko pojačalo, a na njegov izlaz može se priključiti pojačalo s automatskom regulacijom pojačanja radi smanjenja velikih dinamičkih razlika. Zatim dolaze sklopovi za dobivanje željene boje zvuka i određene frekvencijske karakteristike svakog zvučnog izvora. U svakom mikrofonskom kanalu nalazi se regulator razine, koji služi za regulaciju glasnoće i dinamike svakog ulaznog kanala i odnosa između kanala. Na posebna prespojna mjesta mogu se dovesti izlazi uređaja i sklopova za dobivanje različitih efekata (velika promjena frekvencijske karakteristike, odjek, jeka itd.). Određena zvučna slika može se postići promjenom glasnoće i boje zvuka, te dodavanjem odjeka i uvođenjem vremenskog kašnjenja.

Tako obrađeni glazbeni signali pojedinih zvučnih izvora miješaju se u zajedničku zvučnu sliku.

Izlazni signal kontrolira se subjektivno pomoću zvučnika i objektivno pomoću instrumenata. Zvučnik zapravo služi za kontrolu kvalitete, a pokazni instrument za objektivnu kontrolu dinamike, jer i najjači signal ne smije prijeći dozvoljenu razinu niti pasti ispod određene razine. Ta je razina utvrđena za svaku vrstu prijenosa, te iznosi od +6 dB (1,55 V) u normalnim prilikama do +15 dB (4,4 V) iznad 0,775 V za prijenos preko telefonskih linija. U posljednjem slučaju stavlja se radi sigurnosti odjelno pojačalo da bi se, npr., eventualno izbjegao kratki spoj. Ako se radi o izravnom prijenosu, tada se određeni tonski program šalje u radio-odašiljač ili televizijski odašiljač.



Sl. 125. Blok-shema stola za miješanje u kompaktnoj modularnoj tehnici

Najjednostavniji lanac za snimanje jest mikrofonski spoj s pojačalom kojemu se osjetljivost može mijenjati u granicama 1 mV do 1 V, ali s takvim izlaznim naponom da može napajati magnetofon. Uz to je potreban regulator razine signala, te instrument za kontrolu dinamike koja je prema dolje (šum) i prema gore (izobličenje) ograničena karakteristikama magnetofonske vrpce.

Ako se želi iskoristiti dva ili više mikrofona s posebnim regulatorima i zajedničkim pojačalom, potrebno je staviti regulator u svaku mikrofonsku liniju. Takvo je miješanje niskih razina veoma nepovoljno.

Na svim razinama, osim na maksimalnoj, regulator smanjuje i onako već niski mikrofonski napon, pa su zbog toga ti signali podložni utjecaju različitih smetnji, što još više smanjuje omjer signala i šuma. Osim toga slabljenja, nastaje slabljenje u čvoristu, tj. u točki u kojoj su svi izlazi regulatora međusobno paralelno spojeni na ulaz pojačala. Dakle, samo dio ulaznog signala dolazi u pojačalo, a i taj je ovisan o položaju regulatora. Da bi se to izbjeglo, u svaku izlaznu liniju regulatora umeće se otpor. Međutim, sve to još više smanjuje razinu signala. Zbog istih razloga ne smije se izvoditi nikakva promjena niti korekcija intenziteta ni frekvencijske karakteristike, jer je i to u suštini slabljenje signala. Zbog toga se u studijskoj tehnici primjenjuje miješanje signala visoke razine.

Svaki se mikrofoni ili neki drugi izvor (elektroničko glazbalo, magnetofon, gramofon) izravno spaja na svoje ulazno pretpojačalo, koje podiže razinu signala do određene vrijednosti, označene sa 0 dB. Zatim se pristupa regulaciji jakosti, korekciji i dodavanju efekata. Tako je sačuvan omjer signala i šuma i omogućeno miješanje s konstantnom impedancijom, tj. razina je svakog pojedinog kanala neovisna o promjenama razine ostalih ulaza.

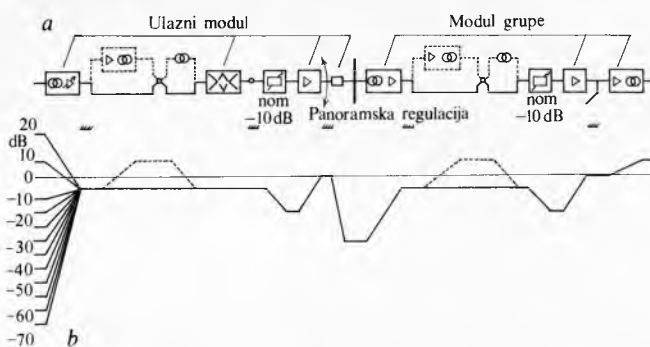
Standardni stol za miješanje. Svi elektroakustički uređaji koji se upotrebljavaju u tonskoj režiji povezani su sa stolom za miješanje. Na sl. 125 vidi se blok-shema stola za miješanje izvedenog u kompaktnoj modularnoj tehnici. Uređaj se sastoji od određenog broja ulaznih mono-modula (M) i stereo-modula (MST), grupnih modula, modula sume. Uobičajeno je oko 20 ulaza i 4 izlaza, što određuje i kapacitet kanala na magnetofonu. Razine su signala studijskih mikrofona u širokim grani-

camu. Stoga se primjenjuje predregulacija u koracima (npr. po 6 dB), koja se postiže promjenom negativne povratne veze u pretpojačalu. Predregulacijom se izbjegava eventualno izobličenje do kojeg bi moglo doći zbog prevelike pobude kod većih signala u pretpojačalu, odnosno kvarenja omjera signala i šuma kod manjih signala u sljedećim stupnjevima. Mikrofonski signal podiže se na razinu +6 dB (1,55 V) iznad 0,775 V, što je standardna razina u studijskoj tehnici.

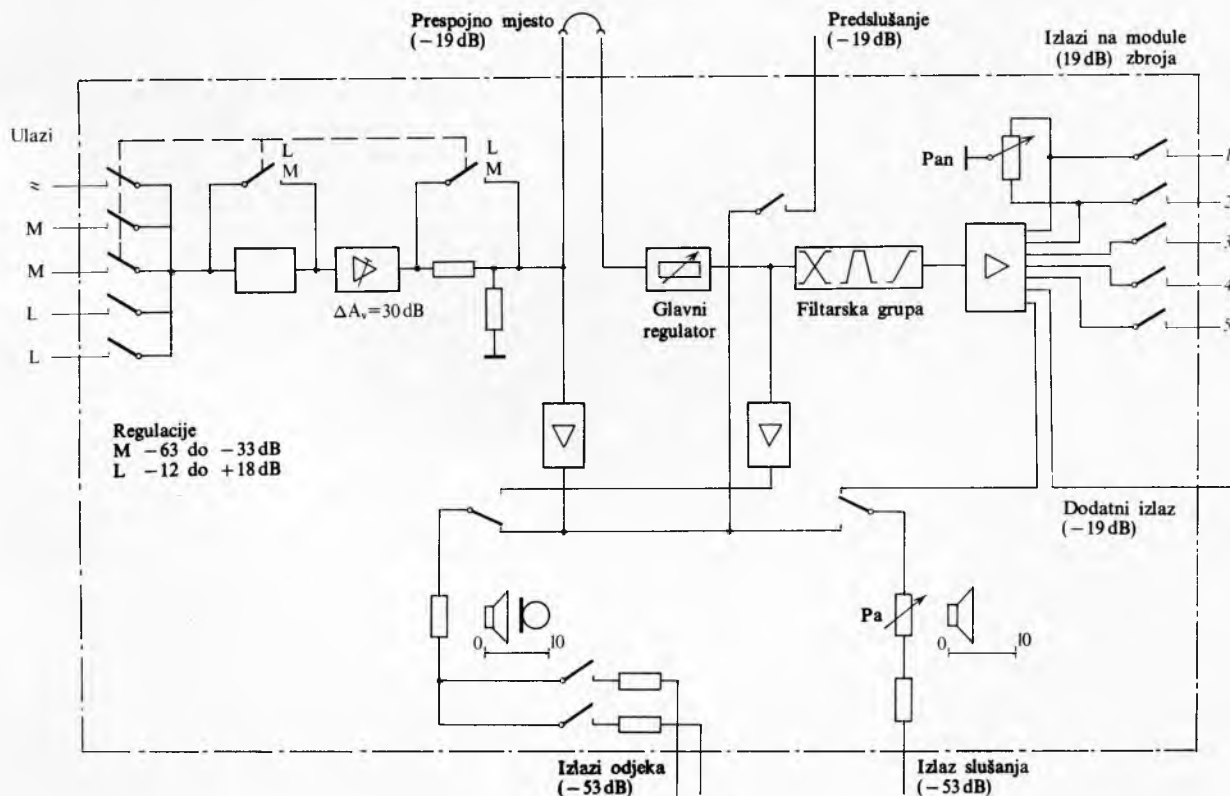
Iza toga slijedi i korekcijsko pretpojačalo, ulazni regulator, panoramski potencijometar, pojačalo grupe, regulator grupe, te modul sume.

Osnovni tehnički podaci koje mora zadovoljiti stol za miješanje odnose se uglavnom na frekvencijsku karakteristiku, izobličenje i omjer signala i šuma. Frekvencijska je karakteristika u području 60 Hz do 10 kHz $\pm 0,5$ dB, u područjima 40 Hz i 15 kHz $+0,5$ dB i -2 dB; izobličenje u području 120 Hz do 5 kHz iznosi 1%, a u područjima 40 Hz i 15 kHz iznosi 2%, omjer signala i šuma veći je od 60 dB. Šum ovisi o položaju regulatora. Na sl. 126a je blok shema ulaznog modula, a na sl. 126b dijagram razine signala u pojedinim stupnjevima stola za miješanje.

Na prespojna mjesta ulaznog modula (sl. 127) mogu se priključiti dodatni uređaji: posebni korektor frekvencijske karakteristike, kompresor, limiter, kompander itd., zatim uređaji za



Sl. 126. Principijelna shema stola za miješanje i dijagram razina signala na pojedinim mjestima



Sl. 127. Blok-shema ulaznog monomodula stola za miješanje (razine su navedene u decibelima iznad 1 mV)

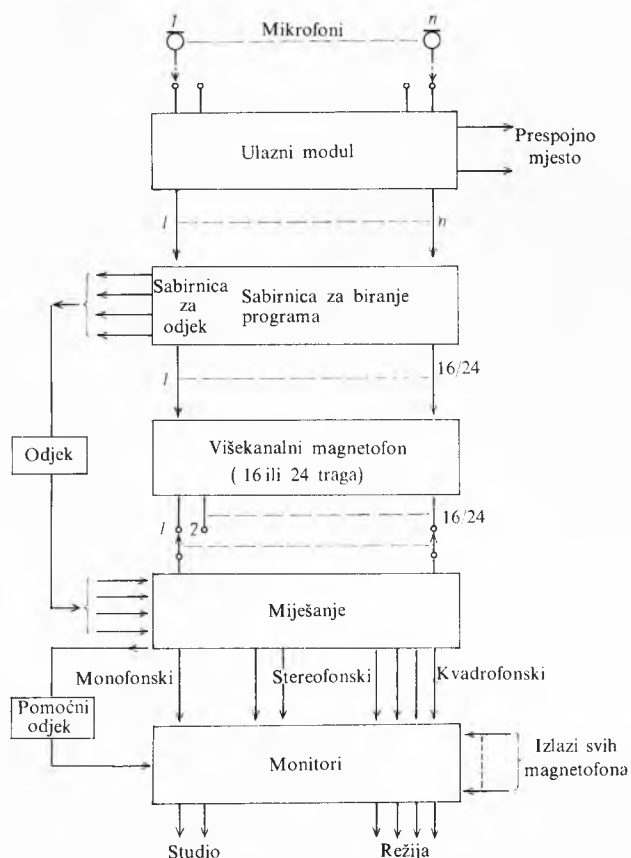
umjetni odjek, linija za kašnjenje, te uređaji za slušanje pri dosnimanju i predslušanje preko posebnog zvučnika pri zatvorenim regulatorima. Tu su zatim različiti korektori, panoramski potencijometar, interfon itd. Takvi stolovi imaju i poseban modul za umjetni odjek, zatim postoji mogućnost ubacivanja odjeka prije ili poslije regulatora itd.

Stvaranje grupa spajanjem određenog broja ulaznih modula na određenu grupu, omogućuje bolje rukovanje i pri snimanju s mnogo mikrofona.

Stol za miješanje za višekanalno snimanje. Stol za miješanje sa 40 ulaznih modula i 24 izlaza može doseći površinu radne ploče do 3 m², a na njoj se nalazi i do 600 gumbi, prekidača i instrumenata. Modularna izvedba stola za miješanje daje velike mogućnosti pri radu uz određenu ekonomičnost izvedbe.

Suvremeni stol za miješanje nije složen samo zbog postojanja mnogih ulaznih i izlaznih jedinica, već i zbog nastojanja svih sudionika (producenta, inženjera, kompozitora, glazbenika) da se pri snimanju i obradbi snimke oplemeni zvuk i da se postigne veća izražajnost. Svaki postupak u obradbi snimanog zvuka na stolu za miješanje daje snimci novu kvalitetu.

Sklopovi za obradbu snimke mogu biti sastavni dijelovi stola, ili se kao pomoćni uređaji spajaju na njega. Iako na svakom suvremenom stolu za miješanje postoje određene posebnosti, osnovni su zahtjevi i funkcije uglavnom isti. Tok signala prikazan je na principijelnoj shemi (sl. 128).



Sl. 128. Funkcionalna shema višekanalnog stola za miješanje

Ulazni modul sadrži neke ili sve od sljedećih funkcija: visokorazinske i niskorazinske ulaze s preklopnici (L linija, M mikrofoni), predregulaciju u mikrofonskom pretpojačalu, promjenu faze, regulaciju glasnoće, modul za odjek, dovođenje odjeka ispred ili iza regulatora, ekvalizaciju, regulaciju panorame, objektivnu i subjektivnu kontrolu svakog kanala posebno, odnosno više kanala zajedno, indikator prevelike pobude; predslušanje svakog kanala, sabirnice za ulaze, izlaze i odjek.

Predslušanje, npr., omogućuje slušanje određenog ulaza jednostavnim pritiskom na tipku, bez praćenja na monitoru. Pri

tom nisu uključene programske sabirnice, pa to može biti učinjeno i za vrijeme snimanja. Tako se može pratiti odvojeno svaki mikrofoni u studiju. Sabirnice su izvedene na različite načine. Na nekim stolovima postoji samo jedna sabirnica po ulazu, a na drugima ih ima više s mogućnošću regulacije između njih. Sabirnice izlaza spojene su izravno na višekanalni magnetofon. Pri tom postoji kontrola svakog izlaza. Signali izlaznih sabirnica mogu se pratiti u monofonskoj, stereofonskoj ili kvadrofonskoj izvedbi.

Mnogi stolovi za miješanje sadrže izlaze za pomoćni odjek, koji se upotrebljava pri miješanju monitorskih izlaza, pa je omogućeno praćenje signala s odjekom bez utjecaja na višekanalnu snimku.

Kad su sve dionice snimljene na višekanalnu vrpcu, pri konačnom miješanju dovode se ti signali sa snimke na linijske ulaze stola za miješanje, gdje se zajednički obrađuju za dobivanje konačne zvučne slike.

Osnovna je razlika između dvokanalnog, odnosno četvero-kanalnog i višekanalnog sustava u tome što je na četvero-kanalnom sustavu program snimljen kao konačni produkt. Kad se snima višekanalno, snimka je zapravo sredstvo za pohranjivanje materijala koji se dalje obrađuje. Kod prijašnjih snimanja nastojala se postići optimalna konačna snimka, jer su bila na raspolaganju samo dva, odnosno četiri kanala. To je zahtijevalo dugotrajno snimanje uz prisutnost svih izvođača orkestra u studiju, i to dotle dok nije postignuta najbolja usklađenost i postava na svim upotrijebljenim mikrofoni. Želja za kvalitetnijom snimkom dovela je do višekanalne snimke. Ako se uz svaki kanal za snimanje i reprodukciju uključi kompander, dobiva se snimka s povoljnim omjerom signala i šuma. Tako je omogućeno snimanje signala bez smanjenja kvalitete. Dakle, pri takvu snimanju ne treba paziti na odnose između glazbala, odnosno instrumentalnih grupa, pa izvođači nakon snimanja nisu više potrebni. Međutim, tek nakon te faze počinje veoma odgovoran posao, konačno miješanje.

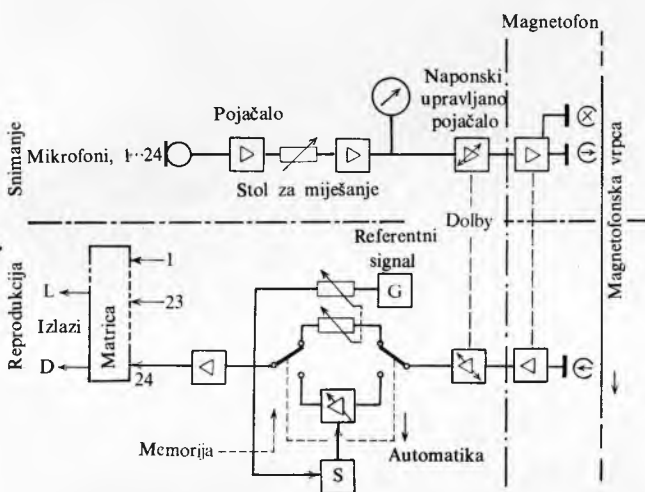
Konačno miješanje zapisanih pojedinih glazbenih informacija (dionica) u biti je isto kao i kod ranijih usklađivanja pojedinačnih mikrofona pri snimanju, ali ipak s jednom bitnom razlikom. Snimljeni zvuk je stalan i ne može se promijeniti kvaliteta izvođenja pojedinih stavaka orkestra i solista prilikom ponavljanja kao pri ponavljanju s izvođačima. Programski se sadržaj pri svakom izvođenju može točno reproducirati.

Zbog sve veće primjene višekanalne tehnike snimanja treba riješiti ispravno ugađanje intenziteta i uravnoteženja između pojedinih kanala u postupku konačnog miješanja, koje može trajati i po nekoliko dana.

Automatsko konačno miješanje veoma je olakšalo rad na izvedbi konačne snimke i dalo nove mogućnosti u radu s višekanalnom tonskom tehnikom. Proizvođači profesionalnih tonskih uređaja primijenili su rezultate razvoja suvremene poluvodičke tehnologije, te komutacijskih i logičkih sklopova i konstruirali uređaje koji su omogućili potpuno nov način rada u fazi konačnog miješanja. Problemi zbog previše regulatora, tonskih filtara i ostalih uređaja, kojima je snimatelj tonova tokom izvođenja konačnog miješanja morao upravljati, praktički su otklonjeni. Tonska slika kod automatskog konačnog miješanja stvara se postupno, tako da pri svakom pokušaju snimatelj tonova ispravlja samo jedan ili nekoliko kanala, te se može jednostavno pratiti ručnim regulatorima na stolu za miješanje. Trenutni položaj regulatora bilježi se za vrijeme rada u memoriju. Memorija može biti vanjska pomoću magnetskog diska, sinhronizirana s višekanalnim magnetofonom, ili se izravno dva kanala višekanalnog magnetofona upotrebljavaju za digitalni zapis položaja regulatora pojedinih kanala. Položaj regulatora i ostalih automatiziranih komandi kvantiziraju se vremenski i po vrijednosti pomoću mikroprocesora koji se na određeni način brzo izmjenjuju i uklapaju u ukupnu zvučnu sliku koja se bilježi u memoriju. Korak kvantiziranja mora biti dovoljno malen da uho ne čuje skokovitu promjenu dinamike i izmjenjivanje upravljanja pojedinih kanala pri konačnoj automatskoj reprodukciji. Memorija treba biti dvostruka (dva kanala na višekanalnom magnetofonu) tako da se prebacivanjem sadržaja iz jednog dijela u drugi, uz dodavanje novih podataka kod svakog

ponovnog pokušaja, uvijek sačuva prijašnje stanje konačnog miješanja. To je važno zato da se zbog eventualne pogreške ne bi cijeli postupak ispočetka ponavljao. Svaki kanal može se naknadno korigirati neovisno od ostalih brisanjem samo njegova dijela sadržaja memorije, pa je tako slučajna pogreška kod konačnog miješanja isključena, a kvaliteta konačne snimke ovisi samo o kvaliteti tonskog materijala snimljenog u prve dvije faze. Konačna izvedba dobiva se potpuno automatski reprodukcijom s višekanalnog magnetofona, pa se može izravno prenositi, snimati na četverokanalni magnetofon i upotrijebiti kao matrica za gramofonske ploče, itd.

Regulatori na većini automatiziranih stolova za miješanje načinjeni su pomoću naponski upravljanih pojačala i imaju poseban indikator kojim se kod uključanja automatskog miješanja može pratiti njihov trenutni položaj. Postoje i izvedbe regulatora sa servomotorima, tako da pri uključanju automatike regulatori pomiču i prate tok kojim su bili upravljani pri dobivanju konačne zvučne slike. Osim prednosti što omogućuje lakše praćenje pojedinog kanala radi eventualne korekcije, taj sustav ima i nedostataka zbog određene mehaničke tromosti servosustava.



Sl. 129. Blok-shema višekanalnog magnetofonskog snimanja i reproduciranja s automatskim konačnim miješanjem

Na sl. 129 prikazan je princip rada jednog od načina automatskog miješanja. Za preprogramiranje upotrebljava se dvostruki regulator. U položaju *ručno* obrađuje se signal na uobičajeni način. U drugoj se grani istodobno bilježe zatečeni položaji regulatora pomoću referentnog signala u memoriju. Pri nađenom najboljem položaju regulatora glasnoće prebacuje se na položaj *automatika*. Nakon toga preuzima naponsko upravljanje pojačalom, pobuđivano od memorije, ukupni posao regulacije koja je prije toga bila ručno postavljena. Primjenom takve tehnike olakšava se posao konačnog miješanja, pa se može više paziti na kritične i osjetljive dijelove programa nego kada treba pratiti sva 24 kanala odjednom.

Procesiranje signala

Procesiranje signala je postupak oblikovanja signala u električkim uređajima za vrijeme snimanja i prijenosa. Procesori su uređaji u kojima se signal obrađuje, a to su: ekvalizatori, filtri, kompresori, ekspanderi, uređaji za umjetni odjek i dr. Procesori su također i uređaji koji ne mijenjaju osnovnu glazbenu karakteristiku signala, ali poboljšavaju kvalitetu prijenosnih kanala, npr. limiteri VF, uređaji za smanjenje šuma, uređaji za smanjenje izobličenja. Nije dobro takve uređaje upotrebljavati za korigiranje onih nedostataka sustava za snimanje koji se mogu otkloniti jednostavnijim zahvatima. Na primjer, nije dobro pomoću njih korigirati položaj mikrofona, nego je bolje premjestiti mikrofoni ili ga promijeniti. Pravilnom upotrebom procesora poboljšava se ili stvara nova zvučna slika. Primjena je nekih procesora reverzibilna (korekcijski filtri i kom-

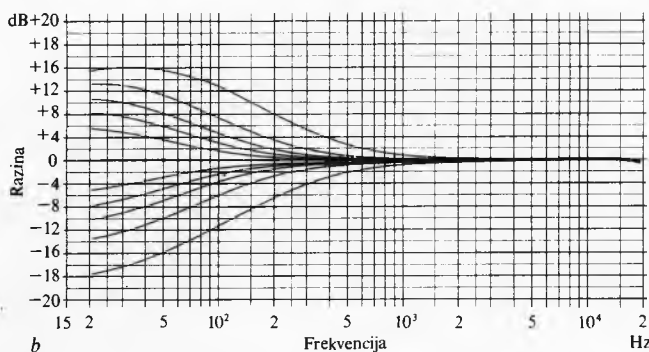
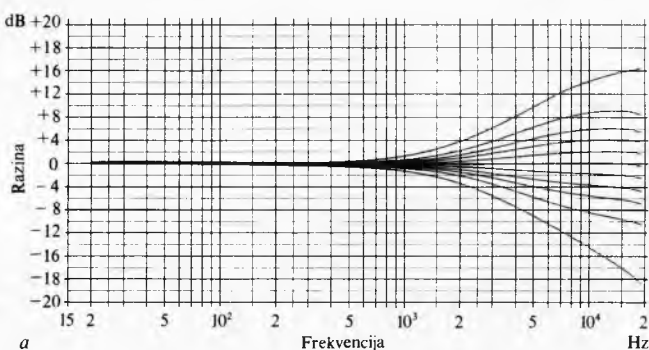
presori), a nekih nepovratna (npr. odjek), pa se više ne može ukloniti iz zvučne slike.

Obradbu signala u procesorima čine frekventijska obradba signala (korektori, filtri, ekvalizatori), dinamička obradba signala (limiteri, kompresori, ekspanderi), potiskivanje šuma (kompanderi, brana šuma), vremenska obradba signala (umjetni odjek, linija za kašnjenje) i postizanje posebnih efekata (vokoder, izmjenjivač faze, modulator, sintetizator).

Uređaji za oblikovanje glazbenog i govornog signala upotrebljavaju se uglavnom pri konačnom miješanju, tako da se uključuju u prespojno mjesto pojedinih kanala.

Frekventijska obradba signala. Svi suvremeni višekanalni stolovi za miješanje imaju i u ulaznom i u izlaznom dijelu aktivne korektore, filtre i ekvalizatore, koji se primjenjuju u različite svrhe, za korekciju frekventijske karakteristike (blago izdizanje ili spuštanje niskih ili visokih frekvencija), strmo potiskivanje nepoželjnih niskih (ispod 120 Hz), i visokih frekvencija, oštro potiskivanje nekih komponenata unutar uskog područja frekvencija, blago izdizanje, odnosno spuštanje određenog frekventijskog područja gdje se nalaze karakteristične komponente u spektru nekog izvora zvuka, npr. formantna područja glazbala. Time se postiže utisak kao da je izvor sniman iz veće ili manje udaljenosti. Prema tom efektu filter je dobio naziv *filter prisutnosti ili filter odsutnosti*.

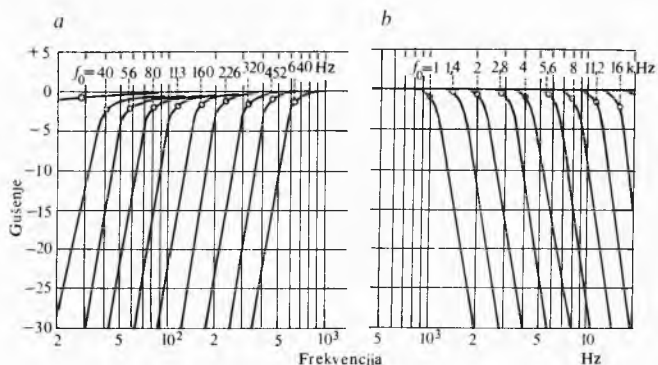
Filtri, korektori i ekvalizatori jesu četveropoli, pa postoje: korektori niskih i visokih frekvencija s tzv. lepezastom karakteristikom (sl. 130), koji se mogu regulirati najviše ± 20 dB na rubnim frekvencijama.



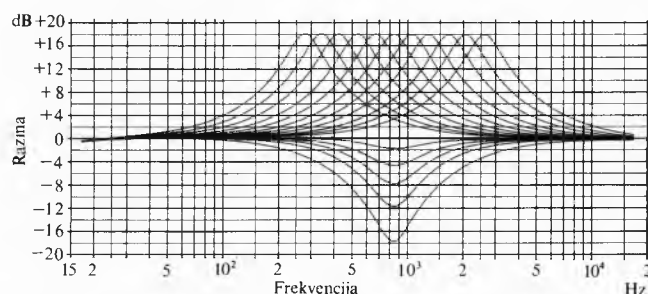
Sl. 130. Lepezasta karakteristika korektora visokih (a) i niskih (b) frekvencija

Niskopropusni i visokopropusni filtri koji se najčešće upotrebljavaju imaju nagibe karakteristike 12-18 dB po oktavi (sl. 131), a složeniji i više. U području čujnih frekvencija oni prigušuju ili samo niske, ili samo visoke frekvencije. Visokopropusni filtri odstranjuju smetnje u studiju, npr. buku koraka, prometa, brujanje pojačala itd. Granične frekvencije mogu se birati skokovito. Niskopropusni filter upotrebljava se za otklanjanje šuma u gornjem čujnom području, koji uzrokuju vrpce, ploče, pojačala i sl. Jednako tako se primjenjuju za potiskivanje psikanja kod pjevanja i govora, nepoželjnog djelovanja drugih glazbala (npr. činela) na druge mikrofone (tzv. preslušavanje), praskanja itd.

Filter prisutnosti ili odsutnosti može pokriti cijelo čujno područje, obično skokovito (sl. 132). Takvom se filterskom



Sl. 131. Karakteristike filtera s mogućnošću promjene graničnih frekvencija. a visokopropusni, b niskopropusni filter

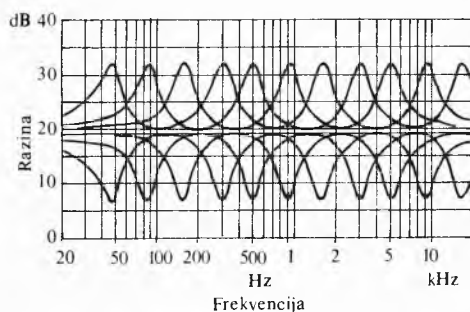


Sl. 132. Karakteristika filtra prisutnosti i odsutnosti

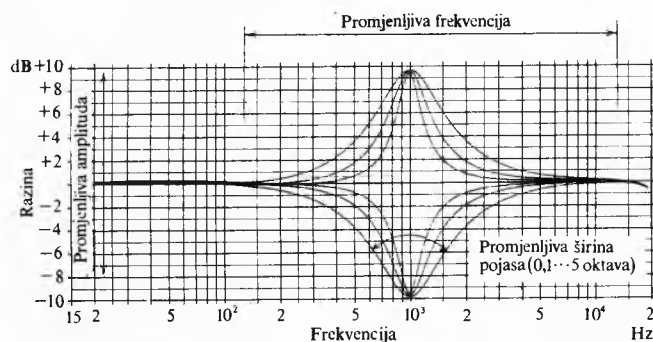
grupom može postići željena frekventijska karakteristika u granicama ± 20 dB čime se može mnogo utjecati na boju određenog glazbala.

Pravilnom upotrebom filtra prisutnosti može se postići slušno odvajanje pojedinih glazbala. Ako se istaknu karakteristične srednje frekvencije nekog glaznala, steći će se slušni dojam kao da je to glazbalo bliže. Tako se mogu isticati i pojedine dionice, poboljšati razumljivost govora, pjevanja itd., sve bez povećavanja glasnoće takva izvora.

Ekvalizatori imaju područje od 20 Hz do 20 kHz podijeljeno na oktavne ili terčne pojaseve (sl. 133), već prema vrsti ekva-



Sl. 133. Karakteristika grafičkog ekvalizatora

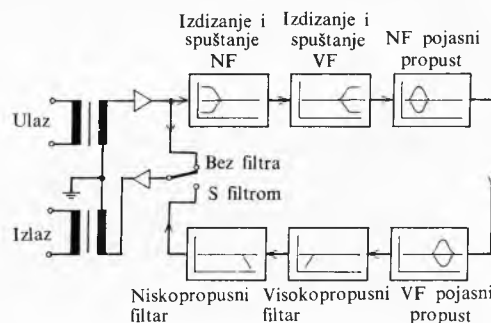


Sl. 134. Karakteristika parametarskog ekvalizatora

lizatora. Upotrebom kliznih potenciometara dobije se tzv. grafički ekvalizator, jer položaj ručica na stolu pokazuje tok frekventijske karakteristike.

Pomoću potenciometarskih ekvalizatora svi se parametri mogu mijenjati (sl. 134). Može se kontinuirano postavljati bilo koja središnja frekvencija, može se neovisno mijenjati širina pojasa, može se mijenjati izdizanje i potiskivanje, itd.

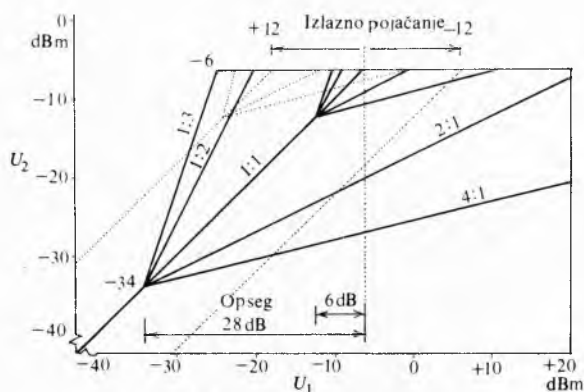
Ako je za neku svrhu potrebno izrazito jako filtriranje, može se na prespojno mjesto modula priključiti poseban filter-ski uređaj, kao npr. univerzalni korektor (sl. 135). Tako se, npr., pri presnimanju ploča upotrebljava filter potiranja i filter šuma radi potiskivanja smetnji od pogonskog uređaja i ploče.



Sl. 135. Blok-shema filteraskog lanca, tzv. univerzalnog korektora za frekventijsku korekciju snimke

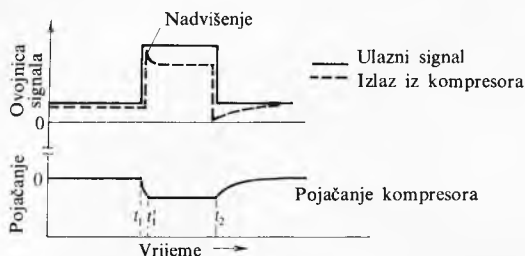
Dinamička obradba signala. Razinom smetnji (kod dobrih uređaja to je praktički razina šuma) ograničena je razina signala s donje strane. Gornja granica također ovisi o uređaju. To je ona razina signala pri kojoj se javljaju izobličenja iznad dopuštene granice koja ovisi o traženoj kvaliteti. Razlika tih dviju razina pokazuje koliku dinamiku, obično izraženu u decibelima, može imati koristan signal. Pri snimanju potrebna je stalna kontrola trenutnih razina signala. Pri magnetofonskom snimanju to je potrebno da veći signali ne bi premodulirali vrpcu, a slično vrijedi i za odašiljač, jer bi to dovelo do izobličenja. Potrebno je i ograničenje dinamičkog raspona signala i zbog drugih razloga, tehničkih ili umjetničkih.

Kompresor je zapravo pojačalo pomoću kojeg se smanjuje pojačanje kad ulazni signal prijeđe određeni prag. To je zapravo pojačalo kojemu pojačanje ovisi o razini ulaznog signala; što je ona veća to je pojačanje manje. Osnovne karakteristike kompresora jesu: omjer kompresije, prag kod kojeg počne kompresija, vrijeme ulazanja i vrijeme izlaska (sl. 136). Pojačanje pojačala iznosi jedan sve do razine praga koja je označena sa 0 dB. Iznad praga izvedena je kompresija s omjerom 2:1 i omjerom 4:1, što znači da svako dalje povećanje ulazne razine za 2 dB, odnosno 4 dB, daje povećanje izlaznog napona za samo 1 dB. U uređaju je izvedena mogućnost ugađanja razine praga i omjera kompresije. Niska razina praga uz veliki omjer kompresije može se primijeniti, npr., za potiskivanje šuma magnetofonskih vrpci i pri amplitudnoj modulaciji radio-signala. Djelotvornost toga postupka, međutim, iznosi samo nekoliko decibela. Pri snimanju ozbiljne glazbe, gdje je potrebna



Sl. 136. Karakteristike kompresora

manja kompresija radi smanjenja dinamike, npr. od 75 dB na približno 50 dB, što je prilagođeno tehničkim mogućnostima uređaja, bit će izabrana visoka razina praga s malim omjerom kompresije. Tim uređajima moraju se vremena ulaženja i izlaženja sklopova za regulaciju pojačanja pažljivo podesiti da ne bi nastale neželjene čujne smetnje, udar (knak) ili tzv. disanje (modulacijski šum). Vrijeme ulaženja (sl. 137) obično je vrlo kratko, iznosi 0,1...1 ms, a vrijeme izlaženja mnogo je duže, 0,1...3 s.

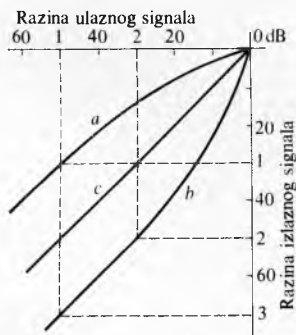


Sl. 137. Grafički prikaz utjecaja vremenskih konstanta (vremena ulaženja i izlaženja) na rad kompresora

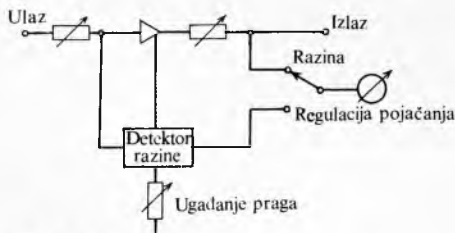
Limitir je zapravo kompresor s velikim omjerom kompresije, većim od 10:1 (sl. 135). Kratko vrijeme ulaženja potrebno je za dobro limitiranje, a vrijeme izlaženja je obično 0,1...1 s.

Treba naglasiti da kompresija smanjuje srednju razinu signala, pa se na račun posebno izvedenog pojačanja smanjuje i omjer signala i šuma.

Ekspander. Signal s komprimiranom dinamikom i smanjenim omjerom signala i šuma može se opet pretvoriti u signal s izvornom dinamikom i omjerom signala i šuma. Taj postupak zove se ekspanzija dinamike, a uređaj ekspander. Da se ne bi pojavila nikakva promjena u signalu, potrebno je da kompresor i ekspander čine komplementarni sustav, tj. da signal poslije prolaza kroz sustav sačuva nepromijenjene dinamičke odnose (sl. 138). Postoje različite izvedbe kompresora. Osnovni dijelovi kompresora jesu: detektor, razina signala, naponski upravljano pojačalo, regulator za postavljanje praga, sklopovi za postavljanje vremena ulaženja i izlaženja, te indikator (sl. 139). Postoje kompresori i s impulsno-širinskom modulacijom i dr.



Sl. 138. Karakteristika komplementarnog sustava za kompresiju i ekspanziju dinamike: a kompresora, b ekspandera, c cijelog sustava



Sl. 139. Blok-shema kompresora

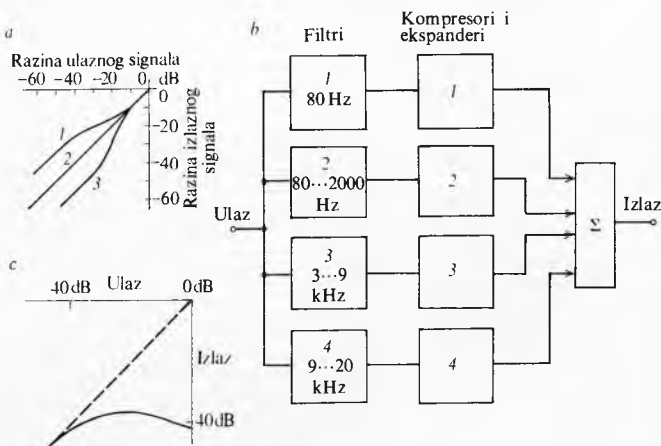
Sustav za smanjenje šuma. Omjer signala i šuma kod više-kanalnog snimanja ovisi o brzini, vrsti i širini vrpce, te o broju tragova. On pri snimanju i reprodukciji iznosi 50...60 dB, što omogućuje dinamiku do 40 dB. Pri konačnom miješanju povećava se šum između kanala. Zbrajanjem signala dva kanala smanjuje se omjer signala i šuma najviše 3 dB, a kod 16 tra-

gova na istoj vrpci taj se odnos smanjuje više od 10 dB. Zato treba smanjiti šum, jer preostala dinamika nije dovoljna za kvalitetnu reprodukciju.

Ekspanziju ne treba upotrebljavati kad je izvorna dinamika manje komprimirana. Međutim, postoje slučajevi kada kompresija i nakon toga primijenjena ekspanzija donose znatna poboljšanja. To se u prvom redu odnosi na šum što ga unosi prijenosni sustav: šum vrpce, preslušavanje, itd.

Ako je, npr. omjer signala i šuma nekog sustava relativno malen (do 50 dB), tada su veoma tiha mjesta izvorne glazbe u razini šuma. Ako se pri snimanju primijeni kompresor prije ulaska signala u kritični dio sustava, tako da ukupna dinamika iznosi 30 dB (crtkane linije na sl. 137), time se postiže da je najslabiji signal samo 20 dB iznad razine šuma. Primjenom ekspandera s inverznom karakteristikom dobiva se izvorna dinamika od 50 dB, a istodobno je šum potisnut 20 dB. Tako je poboljšani omjer signala i šuma na 70 dB. Poboljšani omjer signala i šuma odnosi se na šum koji se pojavljuje poslije kompresije. Šum koji se nalazio u signalu prije kompresije ostaje u istom iznosu.

Takvi sustavi za potiskivanje šuma kritičnih dijelova prijenosnog sustava (magnetofon, gramofon i stereofonski radio-odašiljač) imali su mnogo nedostataka. Nagli signali visokih razina nisu na vrijeme komprimirani i stvaraju izobličenja. Primjenom kraćeg vremena ulaženja djelovao bi kompresor pri sasvim niskim frekvencijama. Šum snimljen poslije kompresije mijenja razinu zajedno s promjenom pojačanja, pa se pojavljuje tzv. efekt disanja. U novijim sustavima za smanjenje šuma ti su nedostaci uklonjeni. Uspješno se, prema potrebi, primjenjuju sustavi: Dolby, Telcom (Telefunken Compounder), BNRS (The Bureau Noise Reduction System), DNL (Dynamic Noise Limiter), JVC/ANRS (Japan Victor Company-Audio Noise Reduction System) i drugi kompanđeri.



Sl. 140. Sustav Dolby za kompresiju i ekspanziju dinamike. a karakteristike kompresora (1), ekspandera (2), cijelog sustava (3); b blok-shema; c karakteristike kompresije diferencijalnog signala

Sustav Dolby za smanjenje šuma mnogo se primjenjuje pri profesionalnom snimanju zvuka. U tom sustavu nema kompresije i ekspanzije signala visokih razina. Tako je smanjena opasnost od nadvišenja pri jakim signalima, koji nastaju samo kada slabom signalu ili stanci prethodi veoma jaki signal. Disanje šuma ne bi se primijetilo uz široki spektar jakog signala. Šum, iako jači pri jačim signalima nego pri slabim signalima, bio bi pokriven (maskiran) signalom. Ako je spektar signala uzak, šum je pokriven u užem frekvencijskom području, dok se ostali dio spektra čuje kao smetnja. Da bi se to izbjeglo, u sustavu Dolby čujni spektar je podijeljen na četiri područja (sl. 140), pa se kompresija i ekspanzija primjenjuju posebno u svakom području i ovisne su o razini signala u tom području, a isto je tako smanjen i efekt disanja. Tri niža područja imaju djelovanje od 10 dB, a najviše 15 dB. Tako šum u onim područjima u kojima nema signala ostaje zbog ekspanzije slab i ne čuje se, a nema ni efekta disanja. Ukupno poboljšanje omjera signala i šuma iznosi ~10 dB.

Sustav JVC/ANRS radi na sličnom principu. Sustav Telcom djeluje u cijelom dinamičkom području i ima logaritamsku karakteristiku. U ostalim sustavima, DBX, BNR i dr. kompendira se preko cijelog audiopodručja s jednim parom kompresor—ekspander. Modulacijski šum (disanje) izbjegava se u tom sustavu predakcentuacijom i deakcentuacijom, tj. korekcijom frekvencijske karakteristike u području viših frekvencija pri kompresiji ekspanzije. Potiskivanje je šuma u tim sustavima 10–15 dB.

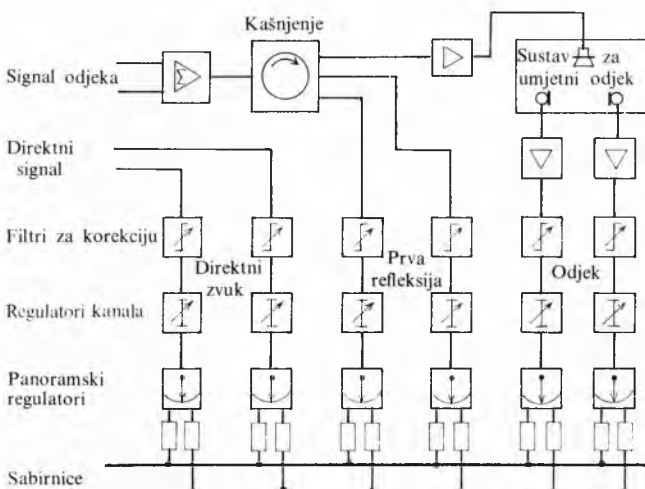
Brana šuma. Kod višekanalnog snimanja upotrebljava se brana šuma (engl. Noise Gate), koja se osniva na pretpostavci da je dinamika tonskog signala ograničena, tj. da ispod određene razine nema korisnog tonskog signala. Ispod određene razine ona oslabljuje sve signale. Brana šuma je otvorena za vrijeme izvođenja nekog glazbala. Međutim, kad vrijednost tonskog signala padne ispod određene granice, svi su takvi signali, bilo šum ili preslušavanje, oslabljeni u tom kanalu. Tako se šum stanke nekog kanala ne pribraja ukupnom šumu konačne snimke, a šum koji prođe s korisnim signalom bit će pokriven. Takav uređaj može se promatrati kao elektronička preklopka. Ako je prag okidanja takve preklopke postavljen relativno visoko, šum će biti trajno oslabljen, ali će nestati i dio signala ispod praga. Pogodnim izborom razine praga postiže se da uho ne zamjećuje takve kratkotrajne stanke u korisnom signalu. Takav se uređaj može korisno primijeniti i za otklanjanje akustičkog preslušavanja. Frekvencijski selektivni sustavi također su pogodni za slabljenje popratnih zvukova glazbala (piskanje, sikanje i sl.) i za poboljšanje zvučne slike.

Vremenska obradba signala. U glazbenoj proizvodnji odjek je u prvom redu estetski problem. Za različite vrste glazbe potrebne su različite akustičke prostorije, već prema tome da li se izvodi koncert za orgulje, simfonijski koncert, gudačka komorna glazba, plesna ili pop-glazba itd., pa bi i odjek trebao biti različit. Snima se veoma rijetko u prikladnim dvoranama, a najčešće u tonskim studijima. Ako je snimanje u studiju s neutralnom akustikom (malim odjekom), tada se takvoj, tzv. suhoj snimci odjek dodaje kasnije.

Pri snimanju govora razumljivost je praktički najvažniji parametar. Pri tom treba znati i to da na razumljivost utječe i akustika prostorije za reprodukciju i snimanje.

Vremenska obradba signala predstavlja dobivanje posebnog zvuka i zvučnih efekata koji se veoma često upotrebljavaju u suvremenoj zabavnoj glazbi.

Umjetni odjek. Pri snimanju približavanje mikrofona izvoru ima određene prednosti. No, takvim se postupkom može na snimci previše smanjiti odjek, odnosno akustički ambijent, što često traži dodavanje odjeka. Da bi se dobio izvorni odjek na snimci koja je dobivena s blizu postavljenim mikrofonom, jednostavno se može postaviti još jedan mikrofonski daleko od izvora, npr. u stražnjem dijelu dvorane. Taj mikrofonski signal samo reflektirani zvuk, pa se dodavanjem tog signala može povećati

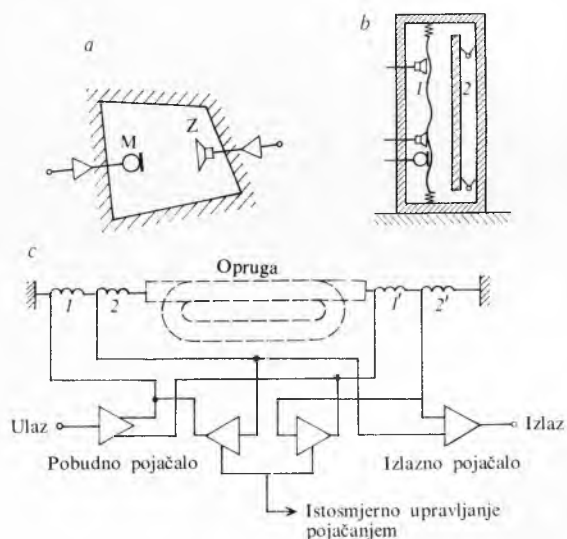


Sl. 141. Principijelna shema dobivanja odjeka i posebnih efekata

efekt odjeka. Dojam je prirodan, što je osobito važno kad se radi o izvornom ambijentu, jer reflektirani zvuk ovisi o odjeku i veličini dvorane.

Odnos direktnog zvuka, prve refleksije i odječnog zvučnog polja bitni su za dobivanje akustične informacije pri snimanju. Često se, međutim, traži da odjek bude bolje prilagođen vrsti snimane glazbe nego što je to u dvorani gdje se snima, a nekad se žele postići i posebni efekti. Da bi se to postiglo, odvođe se ulazni signali sa stola za miješanje (sl. 141) do posebnih sustava za dobivanje reflektiranog zvuka. Ti signali i oni koji idu izvornim putem kroz stol za miješanje mogu se miješati u različitim odnosima i filtrirati.

Odječna komora. Najjednostavnije je dobiti umjetni odjek pomoću odječne komore (sl. 142a). To je prazna prostorija koja ima glatke i tvrde zidove i veliko vrijeme odjeka. Zvuk kojemu se želi dodati odjek dovodi se kao signal iz studijskih mikrofona do zvučnika u odječnoj komori. U istoj se prostoriji nalazi i poseban mikrofonski koji prima reproducirani zvuk iz zvučnika i odjek što ga daje ta prostorija. Tako dobiveni signali dovode se nakon pojačanja u stol za miješanje gdje se dalje obrađuju i miješaju s izvornim zvukom. Taj jednostavan način ima ipak niz nedostataka. Realizacija takve prostorije nije uvijek moguća, a uz to odjek ovisi o svojstvima zidova i veličini prostorije. Poželjno bi bilo da odječna komora bude velika, jer u maloj prostoriji prve refleksije stižu brzo jedna za drugom, pa se ne dobiva dojam velikog prostora. U praksi se upotrebljavaju različiti odjeci. Traži se da se vrijeme odjeka po želji brzo mijenja, što najčešće nije moguće.



Sl. 142. Postupci dobivanja umjetnog odjeka. a) odječna komora; b) odječna ploča, 1 čelična ploča ili zlatna folija, 2 apsorpcijska ploča; c) blok-shema dobivanja odjeka s oprugom, 1 i 1' pobudne zavojnice, 2 i 2' prijemne zavojnice

Mehanički sustavi za dobivanje odjeka. Zbog ograničenja za dobivanje umjetnog odjeka u odječnoj komori razvili su se drugi sustavi. Za dobivanje umjetnog odjeka može se iskoristiti titranje metalnih ploča i titranje opruga.

Odječna ploča je izvedena kao tanka metalna, slobodno viseća ploča dimenzija 1 m × 2 m ili folija od posebne zlatne legure. Ploče se pobuđuju na titranje (radi se o valovima savijanja) dinamičkim ili piezoelektričnim pretvaračima koji su mehanički vezani s pločom (sl. 142b), a dva piezoelektrična ili dinamička pretvarača služe kao mikrofoni i upotrebljavaju se za primanje, npr., stereofonskog signala s odjekom. Vrijeme odjeka s ploče može se mijenjati u širim granicama mijenjanjem razmaka između porozne prigušne ploče od staklene vune i metalne ploče.

U sustavu za umjetni odjek s oprugama, koje služe kao zvukovodi, dobiva se reflektirani zvučni val. Opruge se mogu pobuđivati kao jednodimenzijnski valovodi na torzijsko, kompresijsko i transversalno titranje. Na sl. 142c prikazan je način

dobivanja odjeka s oprugama. Vrijeme odjeka mijenja se posebnim pojačalima.

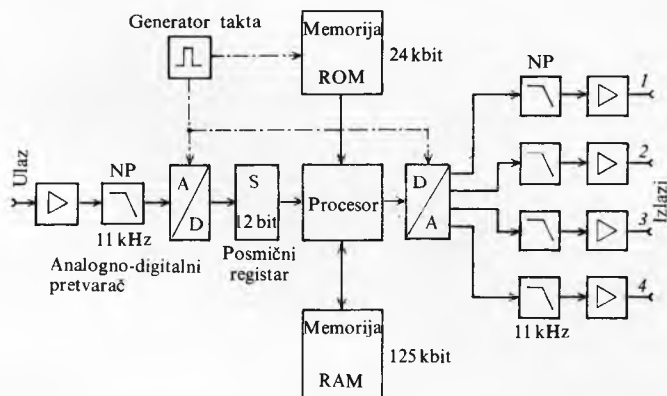
Kašnjenje s magnetofonskom vrpcom. Primjenjivali su se i sustavi s više magnetofonskih glava, postavljenih na određenim razmacima, koji istu snimku reproduciraju sa sve većim kašnjenjem, ili drugi sustavi s linijama za kašnjenje.

Svi ti uređaji za umjetni odjek većinom rade sasvim dobro. Ipak im nedostaju dvije karakteristike koje se odnose na realni odjek u koncertnim dvoranama. To su početno vrijeme kašnjenja i gustoća refleksija. Refleksije koje vrlo malo kasne ne može uho razlikovati od direktnog zvuka. Svi se ti zvukovi stope u cjelinu, pa povećaju glasnoću. Nije moguće točno ustanoviti koje se refleksije stapaju u uhu s direktnim zvukom, ali se smatra da su to one koje nakon direktnog zvuka kasne manje od 35 ms. Uređajima za umjetni odjek, pa ni odječnom komorom manjih dimenzija, nije moguće u potpunosti ostvariti navedene zahtjeve. Zato se vrlo često u praksi ostvaruje kašnjenje signala na putu prema uređaju za 30...50 ms. To se kašnjenje izvodi jednostavno pomoću magnetofona na kojemu je snimljen signal za odjek i odmah se zatim reproducira, a reproducirani se signal odvodi u uređaj za odjek. Kašnjenje određuje razmak između glave za snimanje i glave za reproduciranje na magnetofonu. Takvo kašnjenje pomoću magnetofonske vrpce još se danas upotrebljava u mnogim studijima usprkos očiglednih nedostataka (trošenje vrpce i magnetofonskih glava, itd.).

Uređaji za digitalno kašnjenje suvremeniji su ali su relativno skupi. Sastoje se od komplementarnih analognog-digitalnih i digitalno-analognih pretvarača te niza posmičnih registara kroz koje uskladišteni signal prolazi u koracima kojima upravlja generator takta.

Modularne konstrukcije s određenim brojem registara omogućuju kašnjenje u području 5...500 ms. Osim primjene uz uređaje za odjek, digitalni uređaji za kašnjenje mnogo se upotrebljavaju u razglasnim sustavima za dobivanje najboljeg kašnjenja pri napajanju niza udaljenih zvučnika.

Digitalna tehnika omogućila je unapređenje tonske tehnike. Danas se primjenjuje elektronički uređaj za umjetni odjek koji se sastoji od digitalnog prijenosnog sustava i brzog računala (sl. 143).



Sl. 143. Blok-shema uređaja za digitalno dobivanje odjeka

Ulazni signal preko niskopropusnog filtra dolazi na analognog-digitalni pretvarač i odatle ide u posmične registre, s kojima je postignuto određeno prekašnjenje pogodno za sve programe. Na kraju dolazi signal do procesora. Slijed i način računskih operacija ovisi o programu koji je sadržan u programskoj memoriji tipa ROM. Pojedina mjesta u memoriji adresirana su pomoću generatora takta. Dobiveni međurezultati ulaze u memoriju tipa RAM i mogu se upotrijebiti u različitim programima.

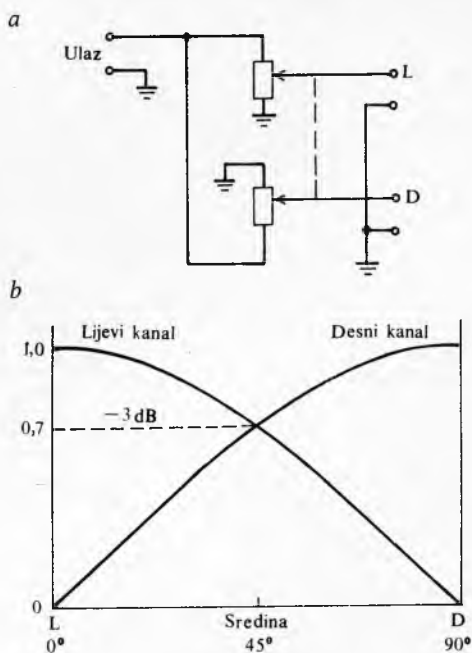
Na izlaz procesora spojen je digitalno-analogni pretvarač koji pobuđuje četiri izlaza (za mono, stereo i kvadrofoni) jedan iza drugoga. Tim uređajima omogućeno je postizanje odjeka, a mogu se regulirati vrijeme odjeka, frekventijske karakteristike i prva refleksija, vremensko kašnjenje do 400 ms, jeka, stereofaziranje, prostorni odjek (engl. space) s vremenom odjeka 10 s i horizontalnom frekventijskom karakteristikom, zborni efekt itd.

Uređaji s memorijom s izravnim pristupom omogućuju bolji izbor kašnjenja. S njima se čak može mijenjati vrijeme kašnjenja istodobno dok signal prolazi kroz sustav, te je tako moguće mijenjati i visinu tona kao npr. kod Dopplerova efekta. Također se mogu dobiti novi efekti, uključujući produženje vremena bez promjene visine tona, višeglasje, automatske harmonije i ponovno dobivanje ispravne visine tona na vrpce koje se snimaju drugom brzinom.

Uobičajeni trik-efekt, kod starijih izvedbi s magnetofonskom vrpcom ili digitalno, automatsko je dvostruko snimanje u kojemu se pomoću stalnog kašnjenja (20...100 ms) za solo-glas postiže efekt dvoglasa (dueta). Drugo je faziranje ili spajanje, kad signal prolazi kroz dva lanca, npr. dva magnetofona od kojih se jednomo brzina kontinuirano mijenja. Tako nastaje efekt šuštanja.

Prostorna obradba signala. Stereofonsko snimanje može se provesti tako da izvor zvuka i mikrofoni zadrže mjesto koje su imali pri snimanju i dalje ostaju nepromijenjeni, ili da se snimanje izvede na sasvim proizvoljnim mjestima koja se kasnije mogu mijenjati.

Tehničkim sredstvima moguće je na snimkama ostvariti potrebnu udaljenost pjevača ili glazbenika od slušatelja. Pri izvođenju klasične glazbe potrebna prostorna dubina u reproduciranom zvuku sasvim je prirodno dobivena postavljanjem mikrofona na određenu udaljenost od orkestra. Udaljenija duhačka glazbala i udaraljke prima mikrofoni s razmjerno velikim omjerom reflektiranog zvuka prema direktnom, pa je njihov zvuk karakteristično raspoređen iza gudačkih glazbala. Pri upotrebi nekoliko mikrofona (što je češće), bliži mikrofoni mogu pokvariti tu prirodnu zvučnu prostornost ako se pri miješanju ne poduzmu primjereni postupci. Prilikom snimanja promjena udaljenosti postiže se izdizanjem ili slabljenjem frekvencija u području 1...5 kHz. Razmještaj lijevo i desno pri stereosnimanju može se izvesti slično prirodnom pomoću parova koincidentnih ili razmaknutih mikrofona. Druga je mogućnost da se monomikrofoni postave na potrebna mjesta. Tada se mikrofonski signal istodobno dovodi na oba izlaza, lijevi i desni, preko tzv. panoramskog potencijometra. U srednjem položaju jednaki naponi vladaju na oba zvučnika, stvarajući pri tom u zvučnoj slici dojam sredine. Ako se okreće panoramski potencijometar ulijevo ili udesno, raste relativna razina signala pojedinog snimanog glazbala u pripadnom zvučniku, što stvara slušni dojam prostornog premještanja tog glazbala (sl. 144). Time je omogu-



Sl. 144. Stereopanoramski potencijometar. a) shema, b) grafički prikaz signala na izlazima; na lijevom kanalu je signal $U_{L\beta} = U_L \cos \beta$, a na desnom $U_{D\beta} = U_D \sin \beta$ (β je kut zakreta osovine panoramskog potencijometra)

ćen jednostavan izbor položaja bilo kojeg glazbala koje se snima, a u već složenu zvučnu sliku može se bez teškoća smjestiti novo glazbalo na željeno mjesto. Kod kvadrofonijske panoramski potencijometar daje u zvučnoj slici dojam prostornog smještaja preko cijelog horizontalnog zvučnog polja. Položaj ručke potencijometra slikovito pokazuje koji je dio prostora obuhvaćen.

Automatski panoramski regulator je uređaj koji priključen između ulaznog monomodula stola za miješanje i izlaza na stereosumu daje na svojim L i D izlazima ritmičke promjene razine. Tako se osjeti pomicanje izvora zvuka po stereobazi. Ritam pomicanja određen je oscilatorom vrlo niskih frekvencija (0,1...10 Hz) koje se mogu kontinuirano mijenjati.

Posebni efekti. Uređaj za *fazni pomak* (engl. phaser) daje i zbraja dva ista tonska signala međusobno vremenski pomaknuta za određeni iznos, takav da na nekoj ili nekoliko frekvencija u sredini čujnog područja signali dođu u protufazu. Na tim se frekvencijama poništavaju signali, što daje poseban slušni dojam. Vremenska faza razlika može se lako postići pomoću linije za kašnjenje ili pomoću dvaju magnetofona s različitim brzinama. Ako se vrijeme kašnjenja kontinuirano mijenja, obrnuto proporcionalno će se mijenjati i frekvencija poništavanja tonskog signala. To daje efekt sličan fedingu pri prijemu amplitudno moduliranog radio-signala.

Uređaj za *udvostručavanje frekvencije* (engl. harmonizer) množi ulaznu frekvenciju sa dva, tako da signal na izlazu zvuči za oktavu više. Budući da se pri tom pomiče i cijeli spektar glazbala, znači da se mijenja boja tona, ta će glazbala zvučati sasvim drugačije nego kad se izvodi za oktavu viši ton. Spektar postaje sličan srodnom manjem glazbalu, tako npr. tenor saksofon zvuči kao alt, trombon kao trublja, a flauta kao mala flauta. Posebni efekti postižu se prstenastim modulatorom. Kada se ulazima privedu dva signala frekvencija f_1 i f_2 , na izlazu se dobiva samo zbroj ($f_1 + f_2$) i razlika ($f_2 - f_1$) tih frekvencija. Oblikovanje tonova može se izvesti i sintetizatorom i vokoderom.

Dalji razvoj. Brojnost ulaznih kanala odraz je sve veće primjene višemikrofonске tehnike. Sve više posebnih sklopova za frekvencijsku korekciju, predregulaciju, odjek, ostale efekte, upravljanje grupama i sl. omogućuje da se odjednom izvede izravno miješanje na dva kanala stereosustava.

Zato se sve više primjenjuje višekanalno magnetofonsko snimanje, presnimanje i konačno miješanje, koje su prvi počeli razvijati Les Paul u SAD i Beatlesi u Velikoj Britaniji. Danas je u svim većim pop-studijima postalo uobičajeno 24-kanalno, pa i 36-kanalno snimanje. Postupak je takav da se na početku pripremi malo kanala na koje se snime najvažniji ritmički instrumenti i vokalna pratnja, solo-glas snima se na kraju, tako da pjevač može pratiti svoju prvu izvedbu. Zatim se na druge kanale, sinhronizirano s prethodnom snimkom, snimaju ostali izvođači tako da oni istodobno slušaju prethodnu snimku preko slušalica ili posebno postavljenih zvučnika. Postupak se ponavlja sve dok se čitav aranžman ne snimi na vrpcu. Pri miješanju za dobivanje stereofonske ili kvadrofonske snimke potrebno je još provesti mnoštvo podešavanja, ali je barem omogućeno snimatelju tona da provede toliko ponavljanja koliko mu treba da u potpunosti izvede zamisao bez opasnosti da ošteti originalnu višekanalnu snimku.

Najnoviji razvoj na tom području donosi automatizaciju u obliku miješanja pomoću elektroničkog računala. Pojedine tvrtke razvijaju različite sustave kojima je osnovno svojstvo da sadrže velike memorije u koje se u digitalnom obliku spremaju podaci o položajima regulatora razine i drugih upravljanja onim redom kako je snimatelj tona pomicao regulatore tokom miješanja. Znači da su u memoriju spremljeni podaci o svim pomacima i položajima nekog od regulatora razine koje sustav može kasnije ponoviti. Tako je omogućeno praćenje manje važnih dionica, što olakšava konačno miješanje.

Jezgra tih automatskih sustava jesu naponski upravljana pojačala ili attenuatori koji su povezani sa svakim regulatorom. Sustav neprekidno ispituje te napone i u digitalnom obliku ih sprema kao informaciju o položaju regulatora. Pri reprodukciji snimatelj tona može imati samo vizuelnu indikaciju, po-

moću instrumenata, npr. o trenutnom ispravnom položaju svakog regulatora, tako da se može posvetiti novom postavljanju. Regulatori su motorom pokretani uređaji kojima upravlja računalo pomoću već spremljenih podataka o prethodnim pomicanjima.

Neki sustavi upotrebljavaju se za sinhronizaciju spremljenih podataka na dva audiotraga, pa se tako mogu pamti dva pomicanja. Kod drugih je samo jedan audiotrag predviđen za spremanje vremenskog koda SMPTE (Sound Motion Picture Technology Engineering). Odvojena memorija sinhronizira se kodom, čime se proširuje memorija za spremanje bilo kojeg pomicanja. Sklop za povezivanje računala osigurava trenutačno poništavanje bilo kojeg pomicanja, te dozvoljava elektroničko sekvenciranje, spajanje ili uređivanje.

Ako se sudi prema do sada ostvarenom stanju, sigurno je da će se digitalna tehnika uskoro proširiti i na postupke završnog snimanja. Zapravo su već sklopovi s impulsno-kodnom modulacijom (PCM) uspješno primijenjeni u digitalnim magnetofonima i gramofonima. I uređaj za reprodukciju, kojim će raspolagati korisnici, bit će također digitalan umjesto analogan, što će sve doprinijeti povećanoj kvaliteti reproducirane glazbe.

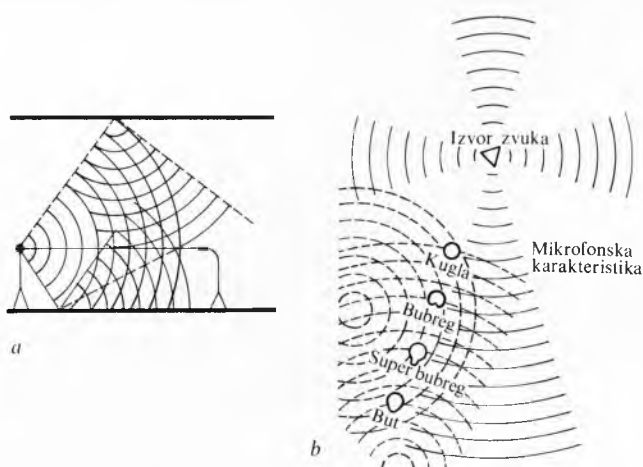
Postavljanje mikrofona

Stol za miješanje obično sadrži više istovrsnih izvora signala. Jedan mikrofoni koji se upotrebljava samo za jedan zvučni izvor, govornika ili solista, ne može najčešće dobro snimiti veliki orkestar. Problem se rješava tako da se svakoj skupini glazbala doda poseban mikrofoni, a na stolu se za miješanje uravnotežuje zvučna slika. Ponekad se to može izvesti i bolje nego u prirodnim uvjetima slušanja. Solistička glazbala male jakosti zvuka, npr. klavičembalo, harfa, gitara, ili pjevač tihog glasa, mogu se na snimci izdignuti i uravnotežiti prema orkestru.

Pri tom se mogu pojaviti i neki nedostaci. Nestručnim postavljanjem mikrofona, upotrebom previše mikrofona i dr. može se pojaviti akustičko preslušavanje, bilo zbog faznih i vremenskih razlika, bilo da zbog različitih odnosa direktnog i reflektiranog zvuka može nastati nejasna snimka.

Pri radu s mikrofonom postavljenim blizu glazbala prevladava direktan zvuk, pa takvu signalu treba dodati odjek.

Snimanje s monomikrofonom. Pri postavi mikrofona može se uočiti da je razumljivost govornika veća ako se nalazi bliže mikrofoni. Što je govornik udaljeniji, u glasu ima više odjeka, a razumljivost postaje slabija. Kad se govori izbliza, zvučni valovi dolaze do mikrofona izravno, pa govor nema živosti. Reflektirani zvučni valovi kasne za direktnim zvukom (sl. 145a) i unose u zvučnu sliku prostornost, pa se dobiva dojam veličine dvorane. Udaljavanjem mikrofona od izvora dolazi se do pojasa u kojemu je energija direktnog zvuka jednaka energiji reflektiranoga (sl. 145b). To se područje zove *Hallov polumjer*, kojemu vrijednost ovisi o akustičkim svojstvima prostorije i o usmjernoj



Sl. 145. Putovi direktnog i reflektiranog zvuka: a u zatvorenoj prostoriji, b za mikrofoni različitih usmjernih karakteristika različiti su i pojasevi jednakih energija direktnog i reflektiranog zvuka

karakteristici mikrofona. Hallov je polumjer to veći što je usmjerna karakteristika mikrofona uža. Povećavanjem udaljenosti između izvora i mikrofona (izvan tog područja) prevladat će reflektirani zvuk. U govoru ima previše odjeka i postaje nerazumljiv. Taj polumjer treba uzeti u obzir i pri postavljanju mikrofona prilikom glazbenih snimanja. Udaljenost mikrofona od orkestra mnogo utječe na dojam glazbene snimke.

Snimanje pjevačkog zbora. Ako se postavi mikrofoni u sredinu ispred zbora, pjevači u sredini prvog reda čuju se osobito jasno, oni iza njih slabije, dok se oni sa strane prema postavi gotovo ne čuju. Treba, dakle, pronaći mjesto gdje će svi pjevači biti približno jednako udaljeni od mikrofona. To se može postići polukružnim rasporedom zbora. Mikrofoni se postavljaju ispred, tako da je usmjeren odzgo prema zboru. Da bi se pri snimanju velikih zborova postigao homogen zvuk, mora se mikrofoni postaviti gotovo izvan Hallova polumjera, znači u prostor gdje prevladava reflektirani zvuk. Tako dobivena zvučna slika nije dobra, tekst je nerazumljiv, a snimka nejasna. Sve se to odnosi na mikrofoni s kuglastom usmjernom karakteristikom koji prima zvučne valove iz svih smjerova. Primjenom mikrofona s užom usmjernom karakteristikom, npr. kardioidnom, dobiva se bolja snimka. Takav mikrofoni ima manju osjetljivost sa stražnje strane, pa manje prima odjek prostorije. No, i taj način ne zadovoljava sasvim, jer odjek dolazi sa svih strana.

Mnogo je bolje pri snimanju podijeliti zbor u dva dijela i ispred svakog dijela postaviti mikrofoni s usmjernom karakteristikom što bliže pjevačima. Signali iz obaju mikrofona međusobno se miješaju i stvaraju transparentnu zvučnu sliku. Također se svakom glasu, sopranu, altu, tenoru i basu, može postaviti mikrofoni, čime je omogućena kontrola jakosti pojedinih dionica. Tako se mogu isticati pojedini glasovi, a može se djelovati i na njihovu uravnoteženost. S više mikrofona može se poboljšati jasnoća zvuka, ali se može pokvariti prostorna dubina snimke. Tenori i basovi koji stoje iza ženskih glasova mogu akustički doći ispred njih, što može pokvariti zvučnu sliku. Isto tako mogu se zbog prevelike blizine istaknuti pojedini glasovi. Taj se nedostatak može izbjeći postavljanjem jednog mikrofona u dvoranu. Kvaliteta snimke ovisi o pravilnom miješanju.

Snimanje simfonijskog orkestra. Pjevački zbor ima niz istovrsnih zvučnih izvora koji zrače prema naprijed. Snimanje orkestralnih glazbala mnogo je složenije. Glazbala imaju šire frekvencijsko područje unutar kojeg se mnogo mijenjaju karakteristike zračenja (sl. 36). Dobro poznavanje usmjernih karakteristika pojedinih glazbala veoma je važno za snimanje. Glazbala u simfonijskom orkestru imaju i različite smjerove zračenja: rogovi zvuče unazad, tube prema gore, trublje i tromboni prema naprijed, violine zrače na stranu itd.

Pri snimanju simfonijskog orkestra u koncertnoj dvorani vrlo je važno poznavanje zračenja cijelog orkestra, jer o tome ovisi postavljanje mikrofona. Na sl. 146 prikazana je postava glazbala u simfonijskom orkestru. Smišljenost je tog rasporeda očigledna. Violine kao najtiše glazbala smještene su sasvim naprijed. Drveni duhački instrumenti i rogovi nalaze se u sredini. Pri tom se rogovi postavljaju ispred zida koji odbija zvuk prema naprijed. Limena duhačka glazbala i udaraljke postavljene su sasvim otraga, jer su to najglasnija glazbala. Takvom postavom dobiva se u akustički dobroj dvorani dobra glazbena ravnoteža koja odgovara i tehničarima snimanja. Zbog veće udaljenosti između slušatelja i orkestra karakteristike zračenja pojedinih glazbala ne dolaze toliko do izražaja kao kod snimanja

s bližim mikrofoni, jer je ukupni zvuk praktički suma reflektiranog zvuka od poda, stropa i zidova.

Mikrofoni postavljanim na mjesto koje je dobro za izravno slušanje ne može se dobiti kvalitetna snimka. Ljudski sluh ima, zahvaljujući osjetu prostora, mogućnosti kombinacije optičkih i slušnih dojmova, sposobnost da se usredotoči na željeni zvuk više nego što to objektivno dopušta omjer direktnog i reflektiranog zvuka na tom mjestu. Mikrofoni na tom mjestu prima zvukove objektivno. Ako se orkestar nalazi izvan Hallova polumjera, do mikrofona dolaze sve prostorne informacije jačeg intenziteta, pa zbog odjeka zvučna slika postaje nejasna. Bolje je mjesto za snimanje između dirigenta i prvog reda, pa se tako može načiniti prihvatljiva snimka.

Zbog različitih karakteristika zračenja pojedinih glazbala može se dogoditi da su neka glazbala pri snimanju zapostavljena s obzirom na druga. To se u dvorani ne primjećuje zbog veće udaljenosti od orkestra, jer na to mjesto dolazi direktni i reflektirani zvuk. Budući da se pri snimanju pretežno prima direktni zvuk, pojedinim glazbalima treba postaviti pomoćne mikrofoni, npr. gudačkima i drvenim duhačkima. Ta se grupa može prema potrebi tonski izdignuti, ali pri tom mogu nastati novi problemi. Nepravilnim postavljanjem pomoćnih mikrofona može se izgubiti prostorna dubina zvuka. Iako se drvena duhačka glazbala mogu u zvučnoj slici pojaviti sasvim naprijed, zbog loše postavke pomoćnih mikrofona može nastati akustičko preslušavanje između glazbala. Preko mikrofona namijenjenog drvenim duhačkim glazbalima prenose se, npr., i limeni duhački instrumenti.

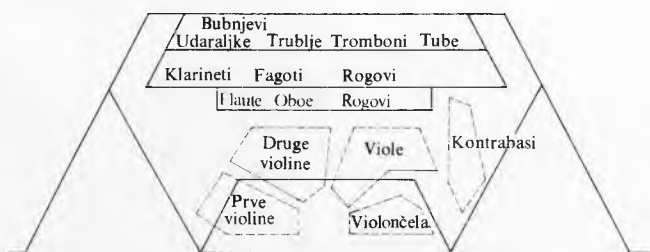
To sve vrijedi za dobru koncertnu dvoranu u kojoj se glazbenici međusobno čuju dobro i u dvorani se podjednako dobro čuju sva glazbala. Ukupni zvuk je homogen i prirodan, a srednje vrijeme odjeka iznosi ~1,5 s. Takvih je dobrih koncertnih dvorana malo, pa se snima u osrednjim, pa i lošim dvoranama. Dobra koncertna dvorana ne bi smjela promijeniti zvuk glazbala. Ima, međutim, niz koncertnih dvorana koje ističu određeno frekvencijsko područje. Ako su istaknute više frekvencije, violine zvuče oštro. Ako je vrijeme odjeka prostorije kratko, zvuk nema živosti, pa se ponekad prenaglašavaju basovi. Stanovite korekcije zvučne slike mogu se provesti na stolu za miješanje pomoću filtera. Takva se obradba, međutim pri snimanju ozbiljne glazbe nerado izvodi.

Stereofonsko snimanje

Kad bi se preko elektroakustičkog lanca najveće kvalitete (idealne frekvencijske karakteristike, velikog dinamičkog područja, bez smetnji, šuma, brujanja i izobličenja itd.) reproducirala glazba, osjetilo bi se da se ne radi o izvornoj izvedbi, već o elektroakustičkom prijenosu. Razlika je u tome što zvuk dolazi s jednog mjesta iz zvučnika, što je neprimodno, jer se pri neposrednom slušanju može uočiti položaj pojedinih glazbala u prostoru.

Da bi se otklonio taj nedostatak, uvedeno je višekanalno snimanje zvuka, koje je počelo kao dvokanalno. Razvijeno je nekoliko načina stereofonskog snimanja. Neki od njih bolji su za snimanje klasične glazbe, jer zadržavaju uravnoteženost i prostornost, drugi pak odgovaraju više potrebama zabavne glazbe. Koincidentni postupci, gdje su dva mikrofona postavljena međusobno što bliže, pogodniji su za ozbiljnu glazbu. To vrijedi i za postupak s prostorno raspoređenim mikrofoni, gdje su dva ili tri međusobno udaljena i postavljena u liniju ispred orkestra. Pri snimanju zabavne glazbe upotrebljava se više mikrofona i kanala, praktički svakom izvođaču daje se poseban mikrofoni. Mikrofoni se postavljaju blizu izvođača radi boljeg odvajanja i poslije se njihovi signali dovode određenom zvučniku, odnosno nalaze svoje mjesto u panorami koja je smještena između zvučnika. Taj se postupak u studijskom snimanju primjenjuje i za klasičnu glazbu.

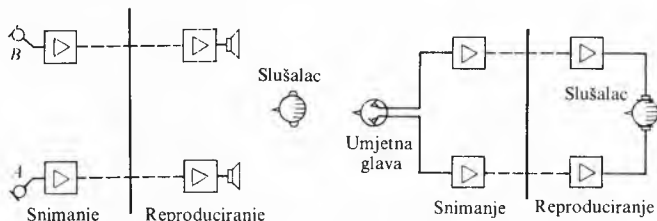
Uvođenje te tehnike u prijenosni zvučni sustav omogućilo je stvaranje prostornog dojma i po širini i po dubini zvučne snimke. Kvadrofonijom i stereofonijom s umjetnom glavom obuhvaćena je i prostorna akustika, iako ti postupci imaju neke nedostatke.



Sl. 146. Standardna postava simfonijskog orkestra

Prostorni osjet. Vrlo je važna osobina ljudskog uha da osjeti smjer zvučnih valova. To se osniva na slušanju s oba uha, jer se razlike koje se javljaju u signalima primljenim jednim i drugim uhom obrađuju u mozgu i pretvaraju u informacije o smjeru. Te razlike mogu biti i razlike u jakosti zvuka u jednom i drugom uhu, vremenske razlike pri dolaženju zvuka na jedno i drugo uho, te fazne razlike.

Vrste stereofonskog prijenosa. Pokazalo se, međutim, da za dobru stereosnimku ne moraju biti jednako ispunjene sve tri pojave. Razvila su se dva postupka stereofonskog snimanja, prvi koji primjenjuje intenzitetnu razliku (intenzitetna stereofonija) i drugi koji primjenjuje razliku u vremenu, a time i u fazi (stereofonija vremenske razlike) između zvučnih valova koji dolaze na dva mikrofona.



Sl. 147. Stereofonski prijenos pomoću koincidentnih mikrofona. a odvojeni mikrofoni, b mikrofoni u tzv. umjetnoj glavi

Postupak AB. Stereofonija AB je postupak snimanja koji se osniva na vremenskoj ili faznoj razlici zvučnih valova koji dolaze na dva jednaka mikrofona s usmjernim karakteristikama, najčešće kardioidnima. Mikrofonu su smješteni na udaljenosti 0,2...1,5 m (sl. 147a). Udaljenost između mikrofona određuje širinu zvučne slike pri reprodukciji. Za male razmake mikrofona ne dobiva se puna stereosnova. Pri veoma udaljenim mikrofona zvučni izvor je pritisnut na krajeve osnove, a u sredini nastaje praznina. Uz pravilno odabranu udaljenost između mikrofona stereofonija AB daje najbolji dojam prostornosti s obzirom na sve poznate stereopostupke, osim stereofonije s umjetnom glavom (sl. 147b). U praksi se taj postupak ipak ne upotrebljava jer nije kompatibilan.

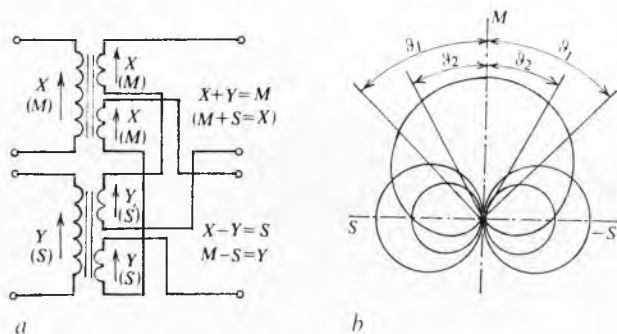
Intenzitetni postupci. Intenzitetna stereofonija, naprotiv, ima veliku primjenu. Za dobivanje prostornosti u zvučnoj slici upotrebljavaju se dva mikrofona smještena jedan iznad drugoga, ali s međusobno zaokrenutim osima za 90°, čime je postignuta razlika u intenzitetu zvuka što ga prima pojedini mikrofoni. To su tzv. koincidentni mikrofoni jer se nalaze na istom mjestu (sl. 148a i b).

Postupak MS. Raspored mikrofonskih karakteristika pri postupku MS (njem. Mitte—Seite) prikazan je na sl. 148c, d i e. Signal iz sredine prima mikrofoni M s kardioidnom usmjernom

karakteristikom i može se upotrijebiti kao monosignal. Uz mikrofoni M nalazi se i drugi, bočni mikrofoni S, s osmičastom karakteristikom, koji je prema prvom zaokrenut u horizontalnoj ravni za 90°. Budući da je vremensko kašnjenje praktički bez značenja zbog koincidencije obaju mikrofona, a zbog različitih usmjernih karakteristika mikrofonski se signali razlikuju samo intenzitetom, pa se njihovi signali mogu obrađivati jednostavno (sl. 148c, d i e). Zbrajanjem mikrofonskih napona M i S nastaje lijevi kanal ($L = M + S$), a oduzimanjem istih napona dobiva se desni kanal ($D = M - S$). Zbrajanjem signala obaju kanala dobiva se monosignal. To se provodi diferencijalnim transformatorom (sl. 149a).

Širina baze mijenja se regulacijom napona S iz mikrofona S (sl. 149b). Tako se zapravo mijenja veličina osmice mikrofona S , čime se mijenja kut. Pri povećanju signala S izvori, koji su bili pod kutom θ_2 pri normalnoj jakosti signala S , prividno se pomiču do kuta θ_1 .

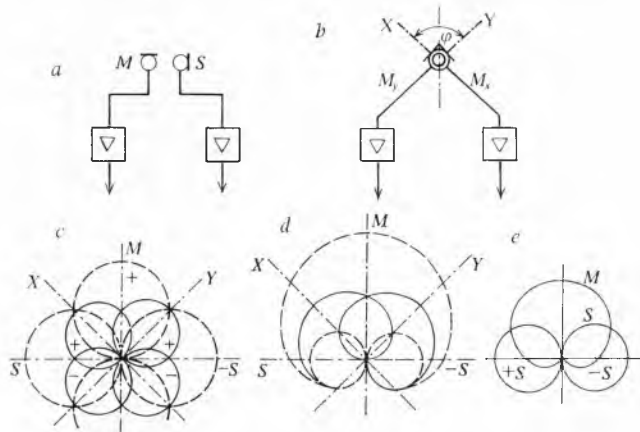
Postupak XY. Diferencijalni transformator nije potreban ako se oba mikrofona iz postupka MS zamijene s dva mikrofona istih usmjernih karakteristika, kardioidnih ili osmičastih (sl. 148c i d) kojima su osi prema osi snimanja zakrenute za 45° udesno i ulijevo (sl. 148b). To je postupak XY stereofonskog snimanja u kojemu oba kanala, lijevi i desni, nastaju izravno ($L = X$, $D = Y$). Područje se snimanja mijenja promjenom kuta između oba mikrofona. Pri postupku MS visoke se čujne frekvencije osobito dobro reproduciraju u sredini zvučne slike, dok pri postupku XY to vrijedi za zvučnu sliku sa strane.



Sl. 149. Shema diferencijalnog transformatora za zbrajanje signala iz koincidentnih mikrofona M i S ili X i Y ili za pretvaranje jedne u drugu zvučnu sliku (a), te ovisnost zbirne karakteristike o kutu φ između mikrofona (b)

Postupci MS i XY međusobno su povezani, te se jednostavnim zbrajanjem i oduzimanjem može prijeći iz jednog sustava u drugi. Naime, vektorski zbroj i razlika informacije MS daje informaciju XY, i obrnuto: $M = X + Y$, $S = X - Y$, gdje su X i Y naponi lijevog i desnog signala, M napon monosignala, a S napon koji daje informaciju smjera.

Informacija M u postupku MS odnosno informacija $X + Y$ u postupku XY, omogućuje monofonsku izvedbu, dakle i jedan i drugi sustav su kompatibilni. To se vidi iz karakteristika mikrofona. Zbrajanjem karakteristika mikrofona X i mikrofona Y dobiva se nova karakteristika usmjerena prema osi sustava. To je zapravo karakteristika normalno postavljene monomikrofona, a upravo takvu karakteristiku ima i mikrofoni M u postupku MS. Znači da informacija $X + Y$ u postupku XY i informacija M u postupku MS sadrže informacije koje bi se dobile i običnim monomikrofonom. Ako se želi iz monosignala ponovno dobiti stereofonska reprodukcija, potreban je signal S , a to je razlika signala X i Y , $S = X - Y$. Signalom S ne dobiva se normalna reprodukcija. Ako se, npr., izvor nalazi točno u sredini između mikrofona, tako da je $X = Y$, nema signala S i ništa se ne čuje. Međutim, taj signal mora postojati da bi se dobio stereoeфект. Signal X dobije se kao zbroj, a signal Y kao razlika signala M i S , i obrnuto. Postupak se tehnički izvodi mosnim spojem ili pomoću diferencijalnog transformatora. Ako se na njegov ulaz dovedu signali X i Y , dobit će se na izlazu signali M i S , a ako se na ulaz dovedu signali M i S , na izlazu će se dobiti signali X i Y (sl. 149a). Iz tog se vidi da su i oba sustava međusobno kompatibilna.

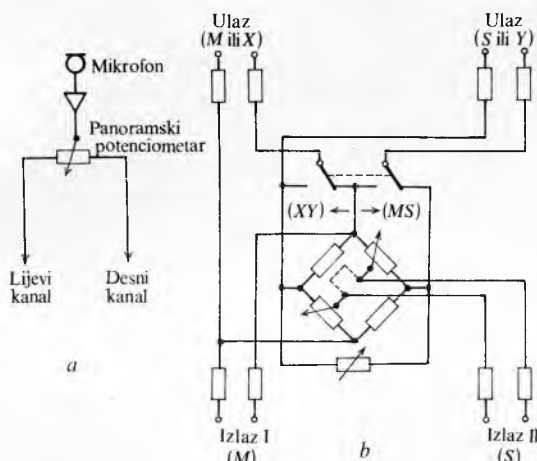


Sl. 148. Karakteristike koincidentnih mikrofona pri stereofonskom snimanju. a postava glavnog (M) i pomoćnog (S) mikrofona, b postava dvaju koincidentnih mikrofona (X i Y) pod kutom $\varphi = 45^\circ$, c zbirna karakteristika postavbe a ili b s osmičastim karakteristikama i d s bubrežastim karakteristikama pojedinih mikrofona, e zbirna karakteristika mikrofona M s bubrežastom i mikrofona S s osmičastom karakteristikom

Da bi se postigla kvalitetna stereofonska snimka, mikrofoni moraju imati jednake frekvencijske, odnosno fazne karakteristike, a preslušavanje između kanala mora biti u dozvoljenim granicama.

Novi problemi javljaju se kod stereofonskog snimanja kad se primjenjuje više mikrofona.

Panoramski potencijometar. Samo je za male zborove ili komornu glazbu u dobrim dvoranama dovoljan jedan koincidentni mikrofonski par za prostorni prijenos zvuka. Kod snimanja većih orkestara potrebni su dodatni mikrofoni za pojedina glazbala ili grupe glazbala, koji se moraju vjerno uklopiti po intenzitetu i smjeru u zvučnu sliku glavnog mikrofona. To se izvodi preko tzv. panoramskog potencijometra kojemu djelovanje prikazuje sl. 150. Prema položaju klizača panoramskog potencijometra dovodi se veći ili manji dio mikrofonskog napona bilo lijevom, bilo desnom kanalu. Kad je klizač u srednjem položaju, pri reprodukciji će se čuti glazbalo što ga snima mikrofonski par u sredini, jer jednaki naponi vladaju na lijevom i desnom kanalu. Tako se može prostorno smjestiti svaki instrument u zvučnoj slici između dva zvučnika. Postupak se može primijeniti na oba načina snimanja intenzitetne stereofonije.



Sl. 150. Shema biranja smjerova u zvučnoj slici pomoću panoramskog potencijometra: a pri snimanju s jednim mikrofonom, b pri snimanju s dva mikrofona M i S ili X i Y

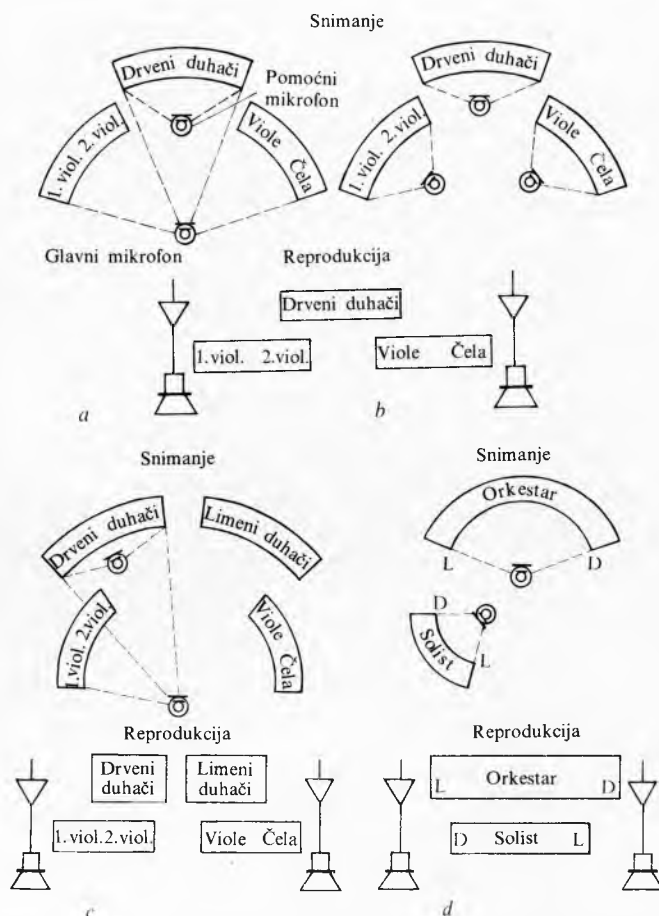
Koincidentni mikrofoni. Snimci velikih orkestara samo s jednim koincidentnim mikrofonom teško se mogu dobro izvesti, već su potrebni i pomoćni mikrofoni, i to jedan ili više pomoćnih koincidentnih mikrofona.

Ako su drvena duhačka glazbala smještena u sredini orkestra, pomoćni se mikrofonski par postavlja na simetrali orkestra koja prolazi kroz glavni mikrofonski par (sl. 151a). Usklađivanje pomoćnog mikrofona s glavnim mikrofonom izvodi se ugađanjem širine njihove osnove. Budući da je pomoćni mikrofonski par bliži drvenim duhačkim glazbalima, širina njegove osnove mora biti uža od osnove glavnog mikrofona. Tim ugađanjem izbjegava se da druge violine i viole ulaze u krajeve osnove pomoćnog mikrofona, što bi neželjeno promijenilo položaj skupina glazbala u reproduciranoj slici.

Pri takvoj postavi može se svakoj od tri instrumentalne skupine dodati po jedan stereomikrofon, pa tada glavni mikrofonski par nije više potreban. Takva postava prikazana je na sl. 151b. Signali iz triju stereomikrofona privode se stolu za miješanje gdje se konačna zvučna slika oblikuje pomoću panoramskog potencijometra i regulatora širine osnove pojedinih mikrofona.

Na sl. 151c prikazan je i prostorni slušni raspored instrumentalnih grupa u zvučnoj slici između dva zvučnika stereosustava za reprodukciju.

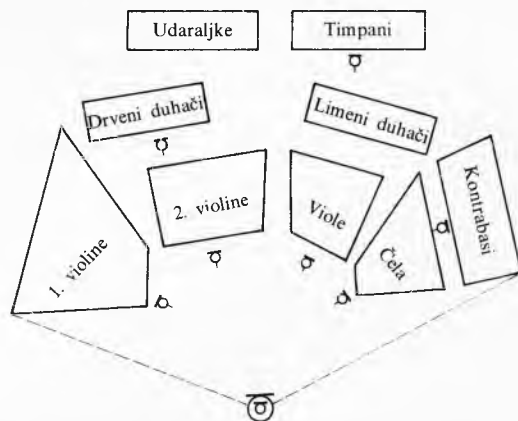
Ako je raspored orkestra takav da su drvena duhačka glazbala iza drugih violina, onda se dodatni mikrofonski par postavlja izvan osi simetrije orkestra koja prolazi kroz glavni mikrofonski par (sl. 152). Potrebno je još uskladiti pomoćni mikrofonski par prema širini osnove i u smjeru s glavnim mikrofonom. Pomoćni mikrofonski par ne smije imati drugi smjer na stereobazi od onog koji je



Sl. 151. Snimanje s koincidentnim mikrofonskim parovima i raspored reproducirane zvučne slike. a glavni i pomoćni koincidentni mikrofonski par, b tri koincidentna mikrofonska para bez glavnog, c glavni i pomoćni mikrofonski par izvan osi snimanja, d zrcalni raspored orkestra i solista

određen glavnim mikrofonom kako se ne bi poremetio raspored glazbala. Pri snimanju orkestra sa solistima često je solist odvojen što omogućuje bolje akustičko odvajanje, potrebno za miješanje. Takav primjer prikazan je na sl. 151d. Da bi se pri reprodukciji izbjeglo preklapanje na udarnim mjestima obaju blokova orkestra lijevo i solista desno, dobro je da se miješanje izvede prema principu zrcalne simetrije; solisti i orkestar miješaju se sa zamijenjenim stranama.

Snimanje pomoćnim mikrofonom. Veliki je nedostatak snimanja koincidentnim mikrofonskim parovima kao pomoćnim mikrofonskim parovima u tome što odjek dvorane dolazi previše do izražaja i što je slabljenje prema nazad kod tih mikrofona nedovoljno. To povećava nejasnoću pri određivanju položaja glazbala. Taj se ne-



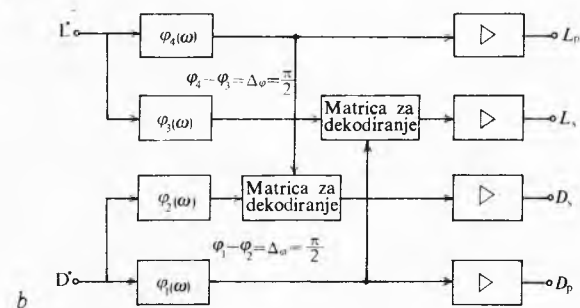
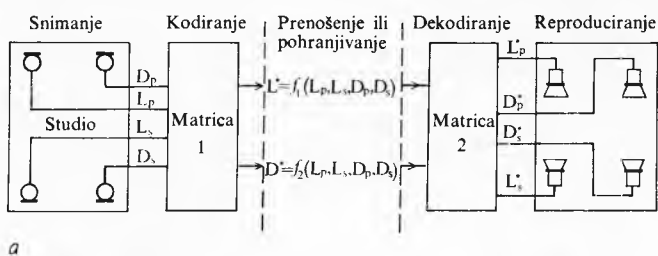
Sl. 152. Položaj glavnog stereomikrofona i pomoćnih monomikrofona

dostatak može mnogo smanjiti ako se kao pomoćni mikrofoni upotrebe monomikrofoni s kardioidnim karakteristikama, pa će odjek dvorane biti slabije primljen. Da bi se pri reprodukciji dobila vjerna prostorna slika skupina glazbala u orkestru, moraju se svi pomoćni monomikrofoni uskladiti s glavnim koincidentnim mikrofonom koji daje osnovu cjelokupnoj tonskoj slici (sl. 152). S panoramskim potencimetrima postavlja se svaki mikrofoni u svoj pravi položaj, tako da mu se i razina signala pravilno podeši, dok širinu prostorne osnove određuje samo glavni mikrofoni.

Time se omogućuje novi način snimanja, tako da se svakoj skupini glazbala dodijeli vlastiti monomikrofoni, a glavni se mikrofoni sasvim izostavi. Tako otpada usklađivanje smjerova pomoćnih mikrofona prema smjeru što ga određuje glavni mikrofoni. Monomikrofoni se pomoću regulatora panorame postavljaju svaki u svoj smjer, dok se položaj glazbala odabire prema vlastitom ukusu na stolu za miješanje, odnosno prema određenim tehničkim zahtjevima. Da bi se izbjegli nepoželjni efekti vremenskih kašnjenja koji ugrožavaju kompatibilnost snimke, preslušavanja pojedinih skupina glazbala preko drugih mikrofona moraju biti vrlo malena. Zato se radi djelotvornijeg akustičkog razdvajanja pri studijskom snimanju često upotrebljavaju zasloni postavljeni između pojedinih skupina glazbala.

Kvadrofonsko snimanje

Iako je dvokanalna stereofonija zaista veliko poboljšanje pri prijenosu i reprodukciji zvuka prema monofoniji, osnovni joj je nedostatak što se zanemaruje utjecaj dvorane na slušaoce. Stoga su uz dva prednja zvučnika dodana i dva sa stražnje strane. Tako je dobiven kvadrofonski sustav, koji se sastoji od četiri mikrofona, četiri prijenosna kanala i četiri zvučnika. Dva mikrofona primaju zvuk s prednje strane, a dva sa stražnje strane dvorane. Zvučnici su raspoređeni prema istom geometrijskom rasporedu kao i mikrofoni, a to znači svaki u jednom uglu sobe (sl. 153). Takav je raspored izabran radi kompatibilnosti sa stereofonijom. Neovisno o tome da li se upotrebljavaju dva ili više prijenosnih kanala, zvučni izvori se slušno nalaze većinom na liniji koja spaja zvučnik za reprodukciju.



Sl. 153. Kodiranje i dekodiranje signala pomoću matrica pri kvadrofoniji. a četiri snimljena, dva prijenosna i četiri reproduksijska kanala, b princip matrice za dekodiranje

Primjenom četiriju zvučnika postavljenih u kutove prostorije mogu se točnije predstaviti intenzitetni i fazni odnosi izvorne izvedbe na mjestima za reprodukciju s obzirom na spektralni sastav i transparentnost složenog zvučnog izvora. Prijenosom tranzijenata odnosi između direktnog i reflektiranog zvuka postaju jasniji. Diskretni postupak zahtijeva četiri kanala, a matricni dva kanala za pohranjivanje i dva prijenosna kanala.

Kvadrofonski matricni sustav. Strogo uzevši, matricni sustavi su dvokanalni. Njihova česta oznaka 4—2—4 znači da se četiri ulazna kanala propuštaju kroz matricnu mrežu ili kodiraju u dva prijenosna kanala i poslije opet dekodiraju u četiri kanala.

Na sl. 153a prikazan je osnovni princip Scheiberove SQ matrice (franc. *Système Quadrofonic*). Četiri ulazna kanala L_c, D_c, L_s i D_s miješaju se u dva prijenosna kanala L i D , koji se poslije razvrstavaju u početne informacije.

Matrica QS (engl. *Quadrosonic System*, tvrtke Sansui) uvedena je ubrzo nakon Scheiberove matrice i ima iste kodirajuće i dekodirajuće koeficijente. Ona isto kao i matrica SQ unosi zaokret za 90° u kodiranju i dekodiranju. To je prikazano na sl. 153b.

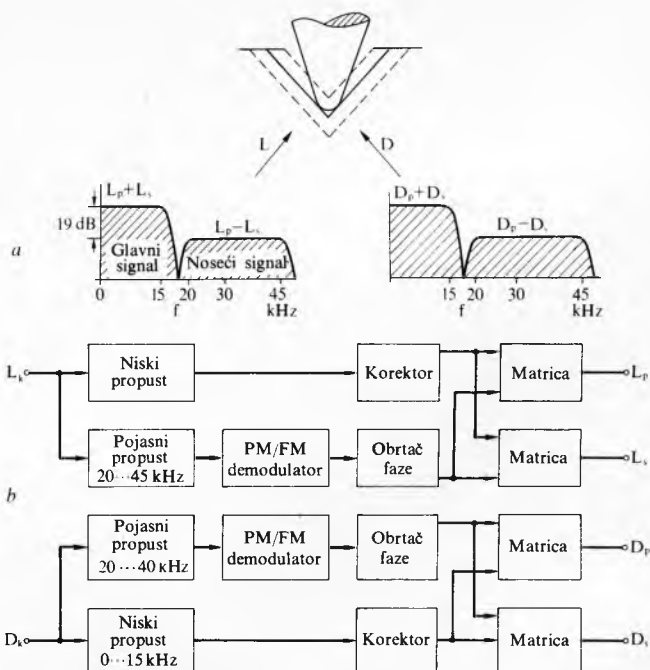
Matrica SQ veoma se razlikuje od onih navedenih, jer nema preslušavanja među susjednim kanalima.

S gledišta studijske tehnike mora se postići najbolja kvaliteta elektroakustičkih prijenosnih karakteristika, kao, npr., preslušavanje, omjer signala i šuma, izobličenje, frekvencijska i fazna karakteristika.

Kvadrofonska reprodukcija pomoću magnetofonske vrpce omogućila je razvoj kvadrofonske gramofonske ploče i prijenosnih sustava. Postoje dva osnovna sustava: matricno kodirani i četverokanalni diskretni sustav.

U prvom sustavu kodiraju se četiri kanala u dva i snimaju se na stereoploču, te reproduciraju i dekodiraju ponovno u četiri. U drugom prijenosnom sustavu snima se i reproducira na četiri odvojena kanala.

Kvadrofonski gramofonski sustav CD-4 (engl. *Compatible Discrete*) u kojemu su dva kanala snimljena na uobičajeni način, a ostala dva pomoću frekvencijske modulacije u području iznad 15 kHz vidi se na sl. 154a. Zbrojeni lijevo naprijed L_p i lijevo straga L_s signali su snimljeni na lijevi bok brazde, a zbrojeni desno sprijeda D_p i desno straga D_s na desni bok brazde uobičajenim stereofonskim postupkom i frekvencijskim opsegom (sl. 154b).



Sl. 154. Kvadrofonski sustav CD-4. a raspodjela signala, b shema dekodera

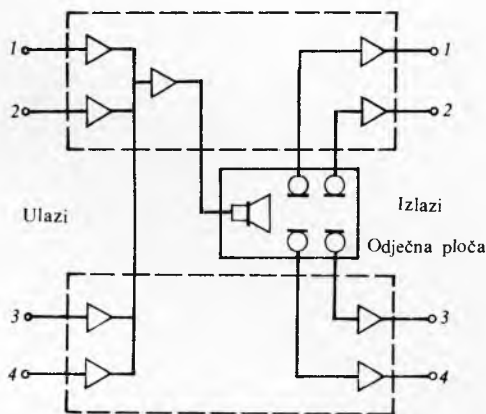
Studijsko snimanje i odjek

Glazbeni studiji obično imaju mnogo kraće vrijeme odjeka nego koncertne dvorane, što ima i svoj razlog. Naime, u tzv. suhoj snimci relativno je jednostavno dobiti odjek, dok se odjek iz snimke ne može izvaditi.

Vrijeme odjeka prostori je veoma utječe na glazbu koja se u njoj izvodi. Za različite vrste glazbe najbolja vremena odjeka su različita, pa čak i djela iz različitih glazbenih razdoblja zahtijevaju drukčiju zvučnu kulisu. Da bi se različite vrste glazbe mogle snimati u istom studiju, studio mora imati kratko vrijeme odjeka. Ipak, određeno kratko vrijeme mora postojati da bi se izvođači mogli međusobno čuti. Potreban odjek za pojedinu vrstu glazbe stvara se umjetno i dodaje se izvornoj snimci.

Suvremeni stolovi za miješanje imaju jednu ili više sabirnica za odjek na koje se privode mikrofonski signali. Udio svakog mikrofona može se regulirati tako da je pri snimanju moguće dati različit odjek različnim glazbalima. Tom se sabirnicom ukupni signal dovodi u odječnu komoru. Signal s odjekom vraća se u stol za miješanje gdje se miješa s izravnim zvukom.

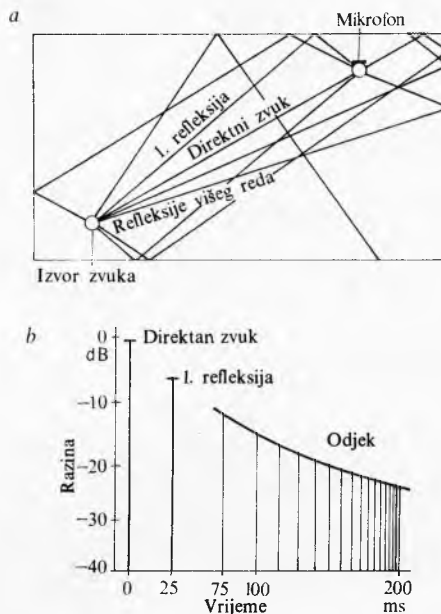
Drugi je način dobivanja odjeka pomoću odječne ploče. To je čelična, elastično ovješena ploča, dimenzija 1 m × 2 m. Na jednom mjestu na ploču djeluje elektrodinamički sustav koji pobuđuje ploču na titranje. Ta se titranja na drugom mjestu ploče pretvaraju u električne signale pomoću piezoelektričnog pretvarača. Odječna ploča sadrži takva dva pretvarača za stereofonsku ili četiri za kvadrofonsku izvedbu (sl. 155). Budući da mikrofonski signali predviđeni za odjek djeluju na odječnu ploču kao difuzni zvuk koji se ne može prostorno lokalizirati, to je za pobuđivanje ploče dovoljan samo jedan pobudni sustav. Više prijamnika može biti postavljeno na ploču nepravilno s obzirom na pobudni sustav. Tako se dobivaju signali s odjekom različitih amplituda i faza, te se mogu upotrebljavati u stereofonskoj i kvadrofonskoj tehnici snimanja. Vrijeme odjeka mijenja se tako da se odječnoj ploči približava ploča od staklene vune. Tako se jednostavno može ugoditi srednje vrijeme odjeka između 0,5 i 4 s. Da bi se smanjile dimenzije odječnih ploča, umjesto njih se upotrebljavaju folije od zlatne legure koje rade na istom principu, ali imaju samo 1/5 volumena. Odječne opruge, posebne proizvodnje, mogu se upotrebljavati u studijskoj tonskoj tehnici.



Sl. 155. Kvadrofonijska ploča za odjek s jednim pobudnim sustavom i četiri mikrofona

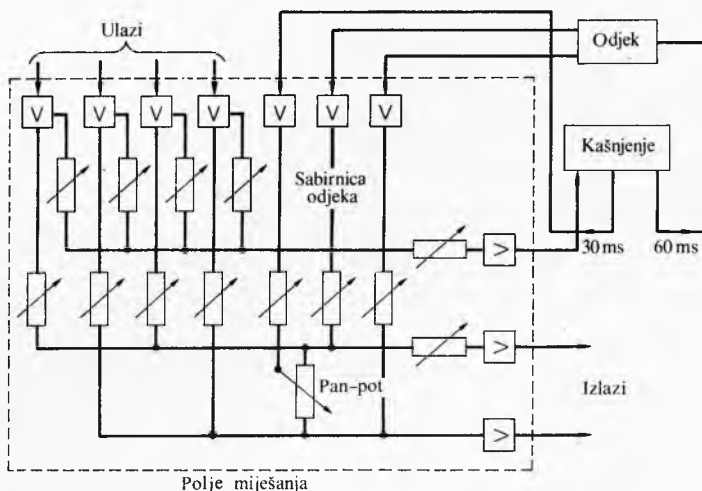
Nedostatak je svih tih sustava njihova osjetljivost na udarce i potresanje. To se izbjegava upotrebom digitalnih elektroničkih uređaja.

Ako se odjek, proizveden na jedan od navedenih načina, doda snimci, snimka zvuči kao da orkestar svira u nekoj maloj prostoriji, jer odjek dolazi odmah nakon nastanka tona. To, međutim, ne odgovara našem slušnom osjetu u nekoj velikoj prostoriji. U velikoj prostoriji s dugim vremenom odjeka mogu se uočiti sljedeće zvučne pojave: nakon kratkotrajne akustičke pobude prvo se čuje direktan zvuk, zatim prva refleksija jednog od zidova i tek se nakon toga čuje odjek (sl. 156a). Vrijeme koje protekne između direktnog zvuka i prve refleksije mjeri se za veličinu prostorije. O prvoj refleksiji ovise i mogućnosti sluha da lokalizira izvor zvuka (Hassov efekt). Vremenski prikaz te pojave vidi se na sl. 156b.



Sl. 156. Direktni i reflektirani zvuk u prostoru. a - nastajanje odjeka u zatvorenoj prostoriji, b razina i vremenski tok odjeka

Kad nema toga kašnjenja, dobiva se dojam malog prostora, jer nije prošlo potrebno vrijeme između direktnog zvuka i prve refleksije. Dugo vrijeme odjeka i slušni dojam malog prostora smetaju uhu. Prva refleksija, bilo od stropa, poda ili zida nakon dolaska direktnog zvuka (~30 ms), može se ostvariti naknadno ako signal za odjek kasni najviše 75 ms. Kašnjenje se može ostvariti, npr., pomoću magnetofona ili pomoću digitalnih sklopova za kašnjenje. Na sl. 157 prikazana je principijelna shema sustava za dobivanje prve refleksije uz kašnjenje odječnog signala. Tako je moguće ostvariti dojam pravog prostora.



Sl. 157. Blok-shema sklopa za umjetnu proizvodnju prve refleksije i odjeka

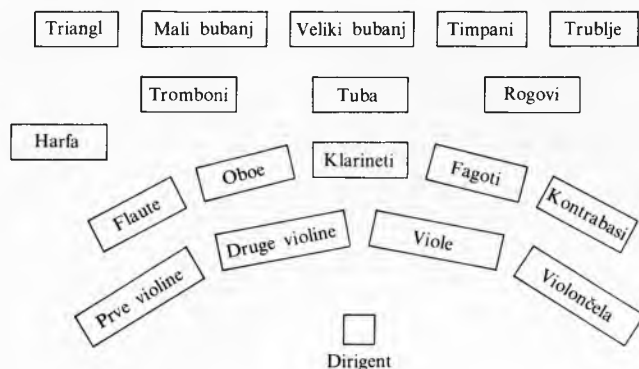
Orkestri, sastavi i broj kanala

Pri izravnoj izvedbi i pri snimanju potrebno je poznavanje orkestrara i glazbenih sastava radi postave glazbala.

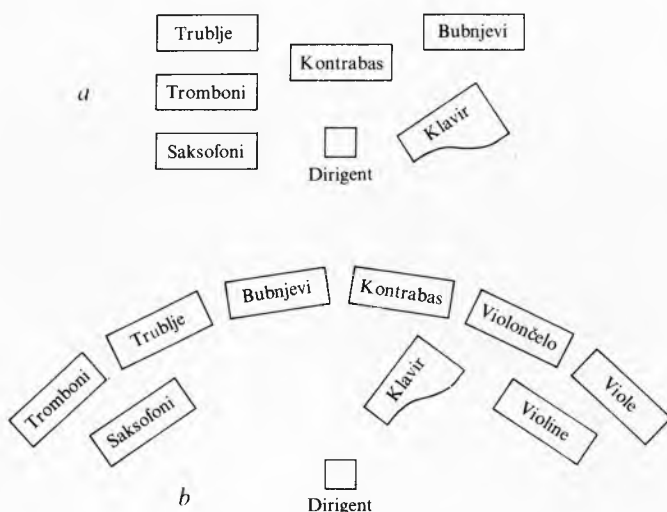
Prema vrsti glazbe postoje i različiti tipovi orkestrara i sastava, kao npr. simfonijski, filharmonijski, operni, komorni, plesni, zabavni itd.

Simfonijski orkestar sadrži četiri osnovne grupe glazbala: gudačka glazbala (violina, viola, violončelo i kontrabas), drvena duhačka glazbala (flauta, mala flauta, oboa, fagot, engleski rog, kontrafagot, klarinet i bas klarinet), limena duhačka glazbala (trublja, pozauna, francuski rog i tuba) i udaraljke (timpani, bas bubanj, veliki i mali bubanj, tamburin, gong, celesta, zvon-

čiči, cjevasta zvana, kastanjete, triagl, ksilofon i čineli). Suvremeni orkestri mogu imati 70 do 120 izvođača a simfonijski orkestar može imati i druga glazbala kao glasovir, harfu i orgulje (sl. 158). Postoje različite postave orkestrara: njemački, američki, i varijante tih postava (sl. 159). Pri izvođenju operne, kazališne i oratorijske glazbe može biti 5 do 50 glazbenika.



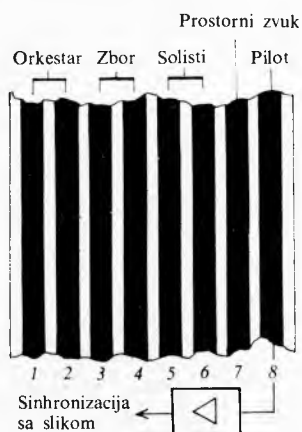
Sl. 158. Postava simfonijskog orkestra prema tzv. američkom načinu



Sl. 159. Postava orkestra: a) zabavnog ili plesnog, b) revijskog

Potreban broj kanala općenito raste s brojem glazbala, ali je ovisan i o načinu snimanja. Za izravno snimanje potrebno je manje kanala nego za studijsko snimanje.

Raspored i podjela tragova za snimanje treba odgovarati broju glazbala, solista i zbora, odnosno glasovne pratnje. Pri izvornom snimanju povoljno je snimiti i žamor, i reakciju publike u dvorani, te eventualno pri reprodukciji prikazati tu akustičku reakciju.



Sl. 160. Raspored višekanalne snimke na osam tragova standardne magnetofonske vrpce, širine 25 mm

Za snimanje simfonijske glazbe većinom zadovoljava 8 tragova (sl. 160). Pri tom se upotrebljavaju dva traga za orkestar, dva za zbor i dva za soliste. Preostala dva traga mogu se iskoristiti za različite svrhe, npr. monofonski signal s odjekom dvorane, sinhronizaciju sa slikom i drugo.

Pri snimanju pop-glazbe i zabavne glazbe potrebno je, ako je moguće, svakom glazbala dodijeliti vlastiti trag, tako da pojedina složena glazbala kao, npr., bubnjeve treba snimati s više kanala (3 do 7).

Kod takve glazbe radi se najčešće o teškim i nepredvidljivim aranžmanima, kojima se dodaju još i različiti efekti posebnim elektroničkim uređajima. Tada se snima na 16, 24 ili 32 traga.

Broj kanala pri reproduciranju glazbe ovisi o načinu snimanja, broju kanala konačne snimke i o sredstvu prijenosa (gramofonska ploča, magnetofonska vrpca ili kaset, radio, televizija ili film), te danas iznosi od jedan do šest kanala (tabl. 11).

DIGITALNI POSTUPCI SNIMANJA I REPRODUKCIJE

Analogna tehnika snimanja, prijenosa i reprodukcije zvuka danas je postigla visoku razinu kvalitete. Ipak, tom se tehnikom gotovo više ne može povećati dinamika pri snimanju i reprodukciji (omjer signala i smetnje) niti poboljšati prijenos tinskog signala.

Dinamika analognih studijskih magnetofona iznosi 60...70 dB. Sustavi za smanjenje šuma (npr. Dolby, Telcom i dr.) povećavaju dinamiku, ali i uzrokuju čujne promjene signala. To se isto događa i kad je višekanalno miješanje, osim kad je ploča izravno rezana.

Pri prijenosu analognoga tinskog signala dinamika ovisi o linearnom području sredstva u kojemu se zapisuje, odnosno iz kojeg se reproducira, te o smetnjama koje nastaju u sustavu snimanja i reprodukcije (šum vrpce, oštećenja na ploči ili filmu, greške na brazdi, brujanje itd.). Dodatne smetnje nastaju i u pogonskom sustavu, zbog potresanja, kolebanja brzine vrtnje itd.

Primjenom digitalne tehnike snimanja, prijenosa i reproduciranja zvuka otklanjaju se mnogi od tih nedostataka, te se postiže kvaliteta reproduciranog zvuka kakva je nezamisliva u analognoj tehnici.

Prednosti digitalne tehnike jesu: a) obradba i snimanje tinskog signala s dinamikom većom od 90 dB, b) veoma malen faktor harmonijskog i intermodulacijskog izobličenja, c) zanemarljivo malo kolebanje brzine vrtnje, d) preslušavanje bolje od 90 dB, e) mogućnost primjena djelotvorne registracije i korekcije grešaka, f) pri presnimavanju ne smanjuje se kvalitet niti se ne unose efekti kopiranja i g) moguća je digitalna obradba tinskog programa pomoću računala (filtriranje, odjek, dinamička obradba, umjetni efekti, glazbena sinteza itd.). Usporedba između analognog i digitalnog sustava vidi se u tabl. 12.

Digitalna tehnika ima i neke nedostatke: nije kompatibilna s analognom tehnikom, brzina prijenosa je visoka (1...2 Mbit/s po kanalu), složeno rezanje ploča i obradba vrpce, veoma visoka cijena uređaja, nedostatak standarda osnovnih parametara itd. Za sada su se u široj upotrebi pojavili samo digitalni gramofoni i ploče, a svi ostali digitalni uređaji primjenjuju se samo u glazbenim studijima.

Tablica 12
USPOREDBA KARAKTERISTIKA ANALOGNIH
I DIGITALNIH UREĐAJA

Karakteristika		Analogni uređaji			Digitalni PCM uređaji
		Magnetofon	Kasetofon	Gramofon	
Dinamika	dB	65	55	60	90
Faktor izobličenja	%	0,5	1	1	0,05
Kolebanje brzine vrtnje	%	0,02	0,08	0,03	(zanemarljivo maleno)
Razina preslušavanja	dB	45	30	30	90

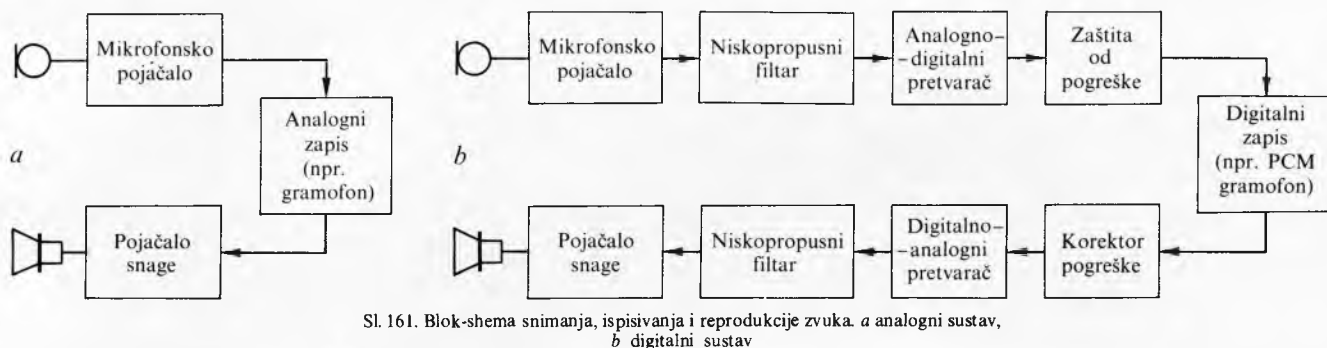
Digitalna obradba tonkog signala

U dosadašnjoj, tzv. *analognoj* obradbi tonkog signala pretvaraju se zvučne informacije, primljene mikrofonom, u kontinuirano promjenljiv električni signal, potpuno vjeran tonskoj pobudi (sl. 161 a). Takav se signal može zapisati pretvaranjem u neko trajno svojstvo prijenosnog medija, npr. u mehanički pomak u tragu na gramofonskoj ploči, magnetizaciju na magnetofonskoj vrpici, zacrnjenje na fotografskom filmu itd. Pri tom postoji izravna ovisnost između akustičkog signala, električnog signala i zapisane fizikalne veličine. Zato se takav signal naziva analognim signalom a kontinuiran je u određenom vremenskom razdoblju.

Prvi se uvjet ispunjuje ograničenjem visokih frekvencija propuštanjem signala kroz niskopropusni filter. U tonskoj tehnici ta se gornja granična frekvencija postavlja tako visoko da je gubitak spektralne širine signala slušno zanemarljiv. Još se uvijek razmatra koja je to gornja granična frekvencija, ali ona je svakako u području 15...20 kHz.

Prema drugom uvjetu uzorkovanja slijedi da je najniža moguća frekvencija uzorkovanja u području 30...40 kHz.

Ako u sustavu za uzorkovanje postoje signali frekvencija viših od gornje granične frekvencije, nastaje intermodulacija sa signalom uzorkovanja, što uzrokuje vrlo neugodna izobličenja jer se pojavljuju komponente kojih nije bilo u izvornom signalu.



U *digitalnoj* tehnici prvo se analogni signal pretvara u digitalni, binarno kodirani signal (sl. 161 b). Digitalni signal ima u usporedbi s analognim signalom potpuno različitu strukturu. On se sastoji od neprekidnog slijeda uskih impulsa. Takav se signal može prenositi ili zapisivati s neusporedivo manje usputnih promjena nego analogni signal. On se može popratnim zaštitnim kodom kontrolirati i po potrebi može se korigirati nastala pogreška. Također popratni signal takta kompenzira kolebanje brzine vrtnje. Za ponovnu upotrebu digitalni se signal obratnim postupkom ponovno pretvara u analogni, i tada se reproducira kao ton.

Pretvaranje analognog signala u digitalni. Analogni signal može se pretvarati u digitalni na nekoliko načina. Jedan od njih je *linearna impulsna kodna modulacija* (PCM), koja se danas smatra najpogodnijom za tonki signal.

PCM sustav za pretvaranje analognog tonkog signala u digitalni (sl. 161 b) sastoji se od analognog ulaza (mikrofonsko pojačalo), analognog-digitalnog pretvarača, stupnja za digitalno procesiranje ili zapisivanje, digitalno-analognog pretvarača i analognog izlaza (pojačalo snage).

Kompleksni tonki signal, kakav je npr. slijed glazbenih tonova, pretvara se u digitalni uzorkovanjem, kvantiziranjem i kodiranjem.

Uzorkovanje. U sustavu PCM uzorak se analognog signala zamjenjuje kvantiziranom razinom signala, koja se zatim prikazuje u obliku binarnog koda karakterističnim redom impulsa sa dva moguća stanja, 0 i 1. Takav impulsi oblik PCM signala omogućuje da se kodne grupe regeneriraju, pa se tako može otkloniti šum, a djelomično i pogreške. Budući da je analogni signal kontinuiran, a to znači da u svakom trenutku ima neku vrijednost, potrebno je ograničiti uzimanje uzoraka samo u određenim vremenskim razmacima. Taj se postupak naziva *uzorkovanjem*.

Pri idealnom uzorkovanju dobio bi se slijed veoma uskih impulsa amplituda jednakih vrijednosti analognog signala u tom trenutku. No, rezultat uzorkovanja može se prikazati i slijedom impulsa konstantne amplitude kojima je frekvencija ovisna o trenutnoj amplitudi analognog signala. Takav se postupak zove *impulsno-amplitudna modulacija* (PAM). Iz PAM signala može se pod određenim uvjetima ponovno dobiti neizobličen analogni signal. Ti se uvjeti nazivaju Shannonovim poučkom, odnosno Nyquistovim kriterijem uzimanja uzoraka, koji glase: a) analogni signal treba imati ograničeno frekvencijsko područje; b) frekvencija uzorkovanja treba biti najmanje dvostruko viša od najviše frekvencije analognog signala, dakle $f_u \geq 2 f_{\max}$.

Da bi se to izbjeglo, upotrebljavaju se vrlo oštri filteri, koji su veoma složeni i skupi. Što je viša frekvencija uzorkovanja, to su filteri jednostavniji, a time i jeftiniji. U sustavima gdje je gornja granična frekvencija 15 kHz, frekvencija je uzorkovanja 32 kHz, a tamo gdje je gornja granična frekvencija 20 kHz, frekvencija uzorkovanja je 42...50 kHz. Kada se prenosi govorni signal (telekomunikacije), gornja je granična frekvencija 3,4 kHz, pa je frekvencija uzorkovanja 8 kHz.

Kvantiziranje je postupak određivanja visina pojedinih amplituda impulsa dobivenih uzorkovanjem. To se određivanje zbog mnogih amplitudnih vrijednosti obavlja s ograničenom točnošću zato što su trenutne vrijednosti amplituda diskretne, pa se uzima neka srednja vrijednost amplitude u trajanju diskretnog stanja. Kvantizator se nalazi u sklopu analognog-digitalnog pretvarača.

Kvantiziranjem se mijenja oblik signala (sl. 162), a pri toj promjeni pojavljuje se pogreška zbog kvantiziranja. Ta je pogreška najveća kada se nekvantizirana vrijednost nalazi na donjoj, odnosno na gornjoj granici intervala, i tada iznosi polovicu širine intervala, dakle $\pm d/2$. Pogreška kvantiziranja može se smanjiti ako se u istom pobudnom području $\pm A/2$ odabere više intervala N , pa je širina intervala $d = A/N$ manja, a time je i manja razlika između sredine intervala i nekvantiziranih vrijednosti.

Utjecaj pogreške kvantiziranja može se usporediti s utjecajem signala smetnje, npr. šuma u analognom sustavu, pa se ta pogreška kvantiziranja naziva i *šumom kvantiziranja*. Smetnja određuje donju granicu dinamičkog područja korisnog signala, a maksimalnom pobudom korisnog signala određena je gornja granica dinamičkog područja.

Procjena korisnog dinamičkog područja D dobiva se iz logaritamskog omjera efektivne vrijednosti signala i pogreške kvantiziranja. Efektivna vrijednost sinusnog signala, amplitude $A/2$, iznosi $u = A/(2\sqrt{2})$. Signal smetnje u_s ima maksimalnu vrijednost kada pogreška kvantiziranja iznosi $\pm d/2$. Logaritamski je omjer tada

$$D = 20 \lg \frac{u}{u_s} = 20 \lg \frac{A}{\sqrt{2}d}, \quad (24)$$

odnosno, prema $A = Nd$,

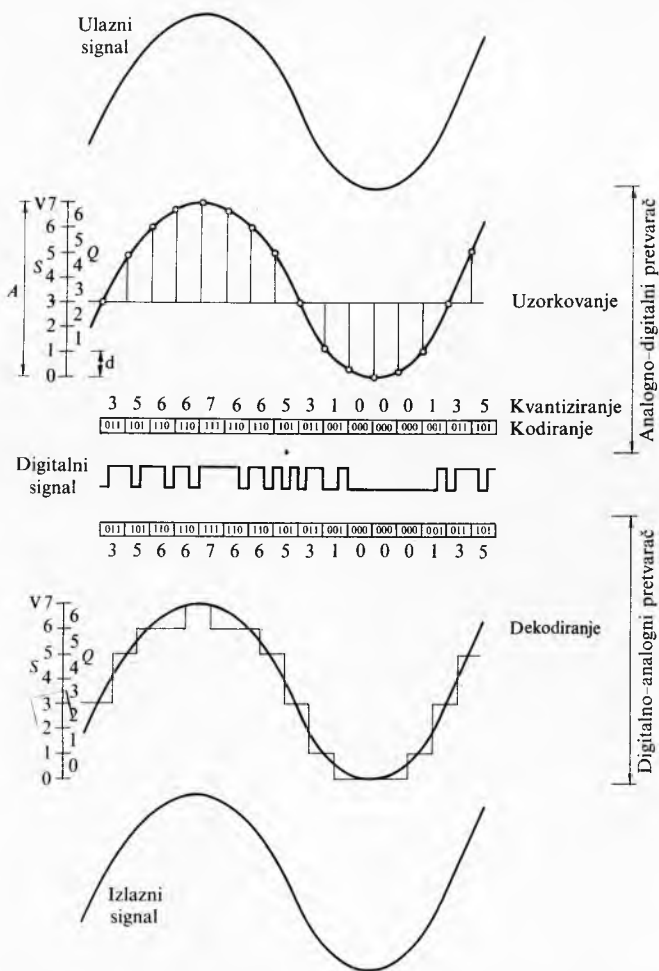
$$D = 20 \lg \frac{N}{\sqrt{2}} \approx 20 \lg N - 3 \text{ dB}. \quad (25)$$

Kako je stvarna pogreška kvantiziranja obično manja, često manja od $\pm d/2$, može se procijeniti približna vrijednost pa ona iznosi

$$D \approx \lg N \text{ dB.} \quad (26)$$

Da bi se dobio potreban broj N intervala kvantiziranja, može se uzeti najbolji omjer signala i šuma $D = 70 \text{ dB}$, koliki je do danas postignut u analognoj tonskoj tehnici, pa je $N = 10^{D/20} = 10^{3.5} \approx 3000$ intervala.

U digitalnoj tehnici omjer signala i šuma mnogo je veći. $D \geq 90 \text{ dB}$, znači veći je više od 10 puta. Za to je potrebno više od 30 000 intervala, tj. potrebno je kvantiziranje s vrlo preciznim razdvajanjem pojedinih impulsa, a takvi su kvantizatori vrlo složeni i skupi.



Sl. 162. Grafički prikaz pretvaranja analognog signala u digitalni i obratno. A maksimalno područje amplituda, S vrijednosti amplituda, Q decimalni redni broj intervala, d širina intervala

Povećanje broja intervala može se nadomjestiti primjenom nelinearnog kvantiziranja, a njime tzv. maskiranje uha. To se maskiranje osniva na tome da jači signal (korisni glazbeni signal) prekriva slabiji signal (šum). Zato su intervali kvantiziranja različiti, za manje amplitude signala intervali su uži, dakle kvantiziranje gušće, a za veće amplitude širi, kvantiziranje je rjeđe. Tako se ukupni broj intervala može smanjiti desetak puta. Ipak, zbog ograničenja u preradbi digitalnog signala u studijskoj se tehnici primjenjuje samo jednolično, linearno kvantiziranje. Prekodiranjem impulsnog signala može se iz linearnog kvantiziranja prijeći na jednostavnije i jeftinije nelinearno kvantiziranje. To će se vjerojatno primjenjivati u PCM radio-prijenosu.

Kodiranje. Kvantiziranjem nastaje N različitih vrijednosti impulsnog signala. Njihove vrijednosti odgovaraju pripadnoj sredini intervala. Svaka od tih N diskretnih vrijednosti prika-

zuje se brojem u decimalnom ili u binarnom brojnom sustavu. To pridruživanje pripadne brojčane vrijednosti zove se *kodiranje* (decimalno ili binarno), a broj intervala je *kodna riječ*. Iz kodne riječi može se dobiti broj intervala. Taj se postupak zove *dekodiranje*.

Signal u kojemu amplitude više nisu izražene kvantiziranim očitanim vrijednostima, nego pripadnim brojčanim kodom zove se *digitalni signal* (v. *Impulsna i digitalna tehnika*, TE 6, str. 445). U digitalnom signalu svi su parametri prikazani samo brojčanim znakovima.

Svaka se diskretna vrijednost amplitude u stupnju za kodiranje, tzv. koderu, koji se nalazi u analogno-digitalnom pretvaraču, prikazuje binarnim brojem. Niz kodnih riječi stvara se brzinom koja je određena frekvencijom uzorkovanja, pri čemu kodna riječ prikazuje signal u sredini intervala kvantiziranja. Kodna riječ je prikazana nizom binarnih električnih impulsa.

Analogni signal, npr. glazbeni ton, prikazan je kao kodirani slijed impulsa (PCM, impulsno kodna modulacija).

Poslije kodiranja kodirani se signal memorira, zapisuje ili prenosi.

Pretvaranje digitalnog signala u analogni. Digitalni signal nije prikladan za izravno dobivanje tona. On se mora prvo iz digitalnog oblika pretvoriti u analogni. Taj se postupak zove digitalno-analogni pretvaranje i obavlja se obrnutim redom nego analogno-digitalno pretvaranje. U digitalno-analognom pretvaraču signalu se stepeničasto aproksimiraju amplitude pojedinih intervala. Takav stepeničasti signal dobro oponaša ulazni analogni signal i ne unosi čujna izobličenja jer je frekvencija stepeničasta viša od 20 kHz. Ipak, da se ne bi pojavila interferencija s drugim frekvencijama, taj se signal kvantiziranja mora filtrirati.

Izobličenja. Omjer signala i šuma D povećava se približno 6 dB po kodnoj riječi, pa je ukupni omjer približno

$$D = 6n \text{ dB,} \quad (27)$$

gdje je n broj kodnih riječi (broj bita). Na primjer za kvantiziranje sa 16 bita $D = 16 \cdot 6 = 96 \text{ dB}$.

U impulsno-kodnom modulijskom sustavu (PCM sustav) postoje dva osnovna uzroka izobličenja; zbog omjera gornje granične frekvencije i frekvencije uzorkovanja, te zbog pojave interferentnih frekvencija. To se događa zato što je vrlo teško načiniti savršeni niskopropusni filter, pa se u konačnom signalu pojavljuju komponente kojih nije bilo u ulaznom signalu. Te frekvencije nastaju zbrajanjem viših harmonijskih frekvencija ulaznog signala f_{ul} i frekvencije uzorkovanja, pa rezultatne frekvencije iznose $n f_{ul} \pm f_u$, gdje je $n = 0, 1, 2, \dots$.

Za signale velikih amplituda analogno-digitalni pretvarači od 14 bita i 16 bita unose zanemarljivo mala izobličenja. Smanjivanjem razine signala povećavaju se izobličenja jer kvantiziranje postaje grublje. Takva se pogreška kvantiziranja ne može smatrati šumom, nego izobličenjem slabijih signala. Kvantizator se ponaša kao ograničivač, pa se pojavljuju neparne harmonijske frekvencije ($n = 1, 3, 5, \dots$). Te harmonijske frekvencije mogu biti i iznad polovice frekvencije uzorkovanja, pa se pojavljuju poseban šum nazvan *granulacijskim šumom*. On se može smanjiti posebnim postupkom.

Osim tih izobličenja nastaju i druga. Za visokokvalitetnu obradu tonskog signala gornja granična frekvencija treba iznositi 20 kHz, a za nju je frekvencija uzorkovanja 50 kHz. Važan podatak za pohranjivanje ili prijenos informacije jest brzina prijenosa. Ona je za digitalnu informaciju jednaka umnošku frekvencije uzorkovanja i broja riječi, a izražava se u bitima po sekundi (bit/s). Pri kvantiziranju sa 16 bita i frekvenciji uzorkovanja 50 kHz brzina prijenosa po jednom audiokanalu iznosi 800 kbit/s, a za stereosnimku 1,6 Mbit/s. To je tako visoka brzina prijenosa da se takva informacija niti s jednim od postojećih sustava za snimanje ne može obraditi bez pogreške.

Široko dinamičko područje nije jedina prednost digitalnih audiosustava. Sva izobličenja i smetnje nastaju pri analogno-digitalnom i digitalno-analognom pretvaranju. Digitalni signal

je otporan na smetnje i ne izobličava se prilikom prijenosa. Dovoljno je da se na mjestu prijema utvrdi greška u signalu. Kumulativna greška može se izbjeći sustavom za otkrivanje i korekciju greške. U tu se svrhu upotrebljavaju zaštitni kodovi koji omogućuju da se greška pri prijenosu utvrdi i naknadno ispravi.

Utjecaj jednog kanala na drugi, tzv. preslušavanje, vrlo je malen, obično ~ 90 dB. Preslušavanje je definirano kao razina napona korisnog signala U_{s1} prema dijelu tog istog signala U_{s2} koji se prenosi kao smetnja u drugi, nepobuđeni kanal, dakle

$$L(s_1, s_2) = 20 \lg \frac{U_{s1}}{U_{s2}} \text{ dB.} \quad (28)$$

Veoma su malena harmonijska izobličenja, zanemarljivo je maleno kolebanje brzine vrtnje pri magnetofonskoj i gramofonskoj reprodukciji.

Osim granulacijskog šuma postoji i cijeli niz manjih izobličenja. Sa 16-bitnim pretvaračima može se postići dinamika i veća od 90 dB. Jedan od načina da se postigne tako velika dinamika jest i izbor prikladne frekvencije uzorkovanja, pa se upotrebljavaju sljedeće frekvencije uzorkovanja: 32 kHz, 44,056 kHz, 44,1 kHz ili 48 kHz.

Postoji, dakle, problem izbora najpovoljnijeg broja bita u digitalnoj riječi koja se primjenjuje u opisivanju stanja amplitude signala u analogno-digitalnim i digitalno-analognim pretvaračima. Taj se najpovoljniji broj bita kompromisno odabire između kvalitete i cijene uređaja.

Uređaji u digitalnoj tonskoj tehnici

U digitalnoj tonskoj tehnici za snimanje i reproduciranje zvuka upotrebljavaju se PCM magnetofoni, PCM kasetofoni, PCM gramofoni i PCM adapteri za snimanje zvuka na magnetskopu.

Jedan od glavnih problema pri konstruiranju digitalnih tonskih uređaja jest obradba mnogih podataka. To je moguće jedino primjenom sustava za zaštitu od greške i za korekturu. Sljedeći je problem nedostatak standarda za važnije parametre digitalne obradbe tonskog signala, ali se očekuje da će se to uskoro riješiti.

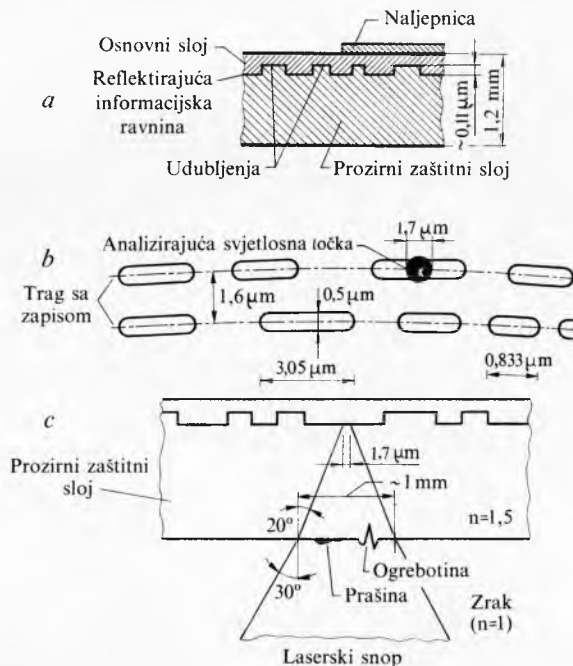
Do sada su se digitalni uređaji upotrebljavali samo u studijskoj tehnici, međutim, danas se na tržištu za široku potrebu, pojavljuju digitalni gramofoni s kompaktnom pločom (CD), a u najnovije vrijeme i digitalni kasetofoni. Nadalje, konstruirani su i ostali digitalni uređaji za obradbu tonskog signala: mješala, filtri, kompanderi, uređaji za umjetni odjek i uređaji za postizanje posebnih efekata.

Digitalni gramofon. Razvoj gramofona počeo je 1877. izumom fonografa (v. *Elektroakustika*, TE 4, str. 316) koji je doživio svoju najširu primjenu upotrebom tzv. dugosvirajuće (LP) gramofonske ploče. Posljednjih godina načinjena su još dva poboljšanja. Jedno od njih su izravno rezane ploče, načinjene tako da je signal urezan u ploču izravno, odmah poslije stola za miješanje. Reprodukcijska tona s izravno rezane ploče slična je izvedbi u živo, jer su izbjegnute dodatne obradbe signala a dinamika je veća. No, trajanje reprodukcije izravno rezane ploče je kraće nego standardne ploče, jer nije urezivano s posebnim sustavom za potpuno iskorištenje. Cijena im je mnogo veća, jer se ne mogu načiniti naknadne korekture, a glazbeno djelo se mora izvesti odjednom, bez prekida. Drugo poboljšanje su ploče s digitalnom predobradbom, koje su snimane tako da je analogni magnetski zapis zamijenjen digitalnim. Te se ploče pogrešno nekada nazivaju digitalnim pločama. One su po kvaliteti ravne izravno rezanim pločama, ali imaju i sve prednosti snimanja standardne ploče. Dinamika im je povećana, smanjen šum, manje preslušavanje, duže trajanje reproduciranja, a reproducira se na standardnim gramofonima.

Od 1978. mnogi proizvođači Hi-Fi uređaja najavljuju proizvodnju digitalnih gramofonskih ploča u kojima je digitalni signal izravno urezan u površinu ploče. Uređaji koji su proizvedeni do 1983. godine mogu se razvrstati u dvije grupe: u prvoj grupi zvučnica ne dodiruje ploču, a u drugoj dodiruje.

U prvoj se grupi primjenjuju laserske zvučnice, a u drugoj piezoelektrične ili elektrostatičke zvučnice, s brazdom za vođenje ili bez nje. Najbolji uspjesi postignuti su s tzv. kompaktnom pločom.

Kompaktna ploča, sa znakom CD (engl. Compact Disc) je PCM gramofonska ploča koja se osniva na tehnologiji Philipsove videoploče. Promjer ploče iznosi 120 mm, debela je 1,2 mm, načinjena od plastike. Digitalni se signal, kao niz udubljenja (engl. pits) dubine $0,11 \mu\text{m}$, različite duljine i različitog razmaka, urezuje u spiralni trag od sredine ploče prema rubu, i to na donjoj strani ploče (sl. 163a). Radi bolje refleksije svjetla ploča se metalizira aluminijem, a radi zaštite od oštećenja i nečistoća prevlači se prozirnim zaštitnim slojem.



Sl. 163. Detalji kompaktne gramofonske digitalne ploče (CD). a presjek ploče, b digitalni zapis u informacijskom tragu ploče, c fokusiranje laserskog snopa na digitalni zapis u tragu

Zvuk se s takve ploče reproducira na posebnom, tzv. digitalnom laserskom gramofonu (sl. 164). Obodna brzina traga na ploči je konstantna, iznosi $\sim 1,25$ m/s. Brzina vrtnje ploče mora se zbog različitih promjera tragova mijenjati kontinuirano, i to od sredine prema obodu od $500 \dots 200 \text{ min}^{-1}$. (tabl. 13).

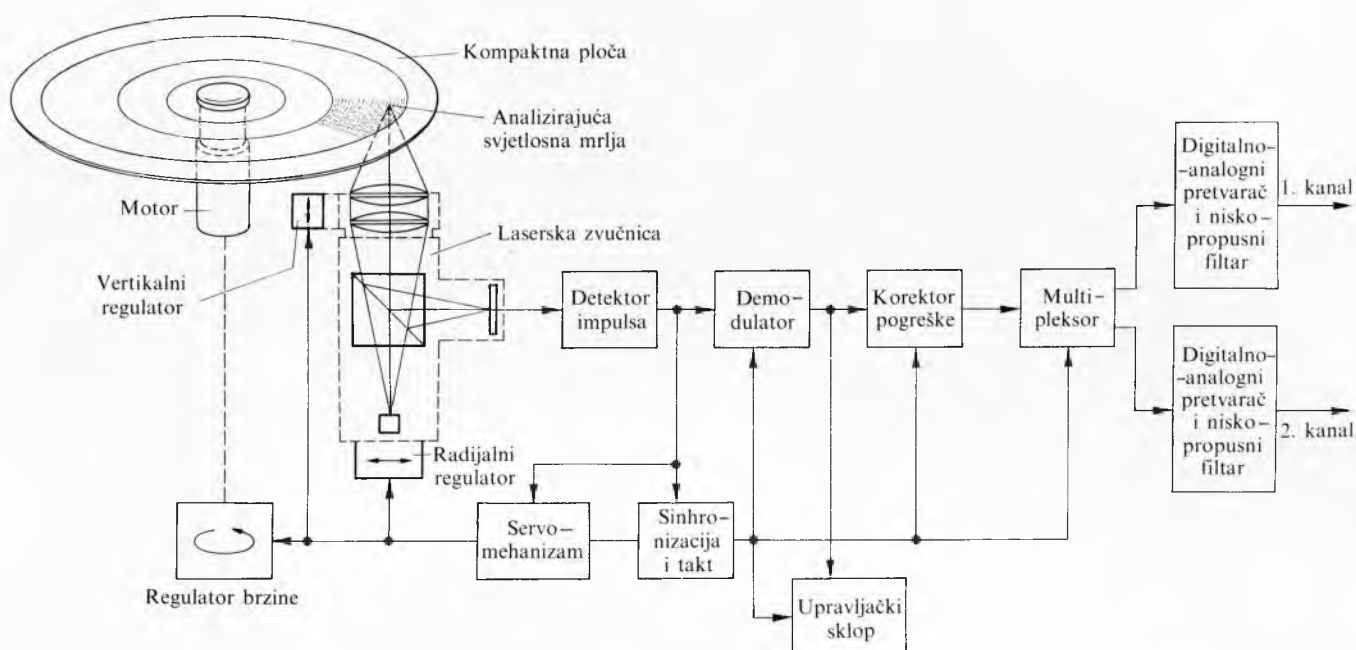
Tablica 13

OSNOVNI PODACI O DIGITALNOM GRAMOFONU ZA REPRODUKCIJU SA CD PLOČE

Vrijeme reproduciranja jedne strane	~ 60 min
Obodna brzina	$\sim 1,25$ m/s
Valna duljina laserskog snopa	780 nm
Dubinska oština	4 μm
Broj kanala	2 ili 4
Kvantizacija (linearna)	16 bit
Frekvencija uzorkovanja	44,1 kHz
Brzina protoka podataka po kanalu	4,3218 Mbit/s
Brzina protoka informacijskih podataka	2,0338 Mbit/s
Korekcija greške	prema CIRC
Način modulacije	EFM*

* Prema eng. Eight to Fourteen Modulation, postupak modulacije u kojemu se zbog lakšeg otkrivanja greške modulira s različitim brojem bita, u ovom primjeru se riječi od po 8 bita pretvaraju u riječi od po 14 bita.

U laserskoj zvučnici svjetlosni snop usmjeruje se na ploču i analizirajuća svjetlosna točka na njoj ima promjer od samo $1,7 \mu\text{m}$. Svjetlosni snop se reflektira na izbočenjima informacijskog traga ploče (sl. 163b) i nakon optičkog filtriranja dovodi na fotodiode na kojima se pretvara u električne signale. Dio svjetlosnog signala služi za upravljanje zvučnicom i reguliranje brzine vrtnje ploče. Sve se to obavlja vrlo precizno, jer razmak između brazdi iznosi $1,6 \mu\text{m}$, a širina udubljenja samo $0,5 \mu\text{m}$.



Sl. 164. Blok-shema digitalnog gramofona za reprodukciju s kompaktne ploče



Sl. 165. Profesionalni sustav za snimanje i proizvodnju digitalnih gramofonskih ploča

Laserska zraka ne registrira prašinu i nečistoće na ploči, jer je lećama omeđena dubinska oštrina na samo $2\text{ }\mu\text{m}$ (sl. 163c).

Miniploča, sa znakom MD (engl. Mini Disc) digitalna je gramofonska ploča koju je proizvela tvrtka Telefunken/Teldec. Digitalni signali urezani su obostrano u ploču od plastike. Promjer ploče je 135 mm , brzina vrtnje konstantna, 300 min^{-1} , a trajanje reprodukcije $2 \times 60\text{ min}$. Digitalni je signal zapisan u brazdi trapezastog presjeka u obliku izbočenja i udubljenja. Zvuk se s miniploče reproducira posebnom piezoelektričnom zvučnicom koja s gornje strane dodiruje ploču. U drugoj izvedbi upotrebljava se tzv. plivajuća zvučnica (engl. Mini

Float). To je dijamantni klizač koji pliva u tekućini u brazdi ploče, tako da praktički ne dodiruje ploču.

Usporedba postupaka. Opisani digitalni gramofoni, kao i oni koji su još u eksperimentalnoj fazi, po svojim parametrima veoma su iznad slušnih zahtjeva, a klasičnom ih je analognom tehnikom gotovo nemoguće postići. Smetnje koje u klasičnim pločama nastaju kao posljedica prašine u brazdama, elektrostatskih izbijanja i oštećenja u digitalnim sustavima potpuno ili gotovo potpuno izostaju. U sustavima s beskontaktnim zvučnicama, kao što je to kompaktna ploča, nema nikakva habanja pri reprodukciji, a u onima s kontaktnom zvučnicom

habanje je gotovo zanemarljivo. Zato se produžuje i trajanje zvučnica, onih beskontaktnih na garantiranih 2000 sati (a predviđa se i 5000 sati), a onih kontaktnih na 1000 sati reprodukcije. Trajanje reprodukcije s jedne ploče mnogo je duže nego s običnih ploča, iznosi oko 1 sat po strani ploče, a osim glazbenog dijela još preostaje mjesta za popratne informacije o djelu, kompozitoru, izvođaču itd. Pomoću dodatnih informacijskih sklopova moguće je upravljati reprodukcijom, brzo pronaći određeni dio na ploči, te odrediti redoslijed pojedinih dijelova glazbene kompozicije koja je zabilježena na ploči.

Zaštitni kod. Digitalno zapisivanje informacije omogućuje i primjenu zaštitnog koda kojim se sprečava pogrešno očitavanje informacije i nadomještava izostanak nekog podatka. Na kompaktnim pločama primjenjuje se zaštitni kod CIRC (engl. Cycle Redundancy Check Code), koji nosi podatke o strukturi svake kodirane informacijske riječi tonskog signala. U dekoderu se provjerava da li je neki znak pogrešno primljen, i ako jest, tada se ispravlja. Ta se korekcija obavlja pomoću podataka koje nose zaštitni znakovi. Tako se može ispraviti više od 3500 uzastopno pogrešno primljenih bitova, što odgovara oštećenju traga na ploči dugačkom $\sim 2,4$ mm. Međutim, kako su znakovi u zaštitnom kodiranju i vremenski raspodijeljeni, moguće je nakon dekodiranja popraviti i veća oštećenja, jer je mala vjerojatnost da su sve uzastopne kodirane riječi pogrešno primljene. Interpolacijom, tj. nalaženjem srednje vrijednosti amplitude između dvaju pravilno primljenih znakova, može se postići približna vrijednost pogrešno primljenog znaka. Tako se može rekonstruirati i više od 12000 pogrešno primljenih bitova, što odgovara duljini traga od ~ 8 mm. Trajanje je aproksimiranog dijela signala nekoliko stotinki sekunde, što se pri slušanju ne može ni primijetiti. Pri još većim oštećenjima traga na ploči nije moguća korekcija ili interpolacija, ali tada se automatski zvučni signal postepeno utišava, i nakon prestanka greške ponovno postepeno pojačava. Proizvođači ploča navode da je vjerojatnost nekorrigirane i neinterpolirane greške pri reproduciranju manja od jedne kodne riječi u mjesec dana. Zato je potrebna velika brzina prijenosa koja po kanalu iznosi 4,3218 Mbit/s.

Digitalni magnetofon. Digitalni magnetofoni uglavnom se upotrebljavaju u studijskom snimanju zbog vrlo visoke kvalitete reproduciranog signala, koja omogućuje dobivanje analognih gramofonskih ploča s dinamikom većom od 70 dB.

Jedan od problema koji se javio u postupku digitalnog snimanja na magnetofonsku vrpce je odabiranje frekvencije uzorkovanja. Do sada su razvijena dva sustava, s frekvencijama uzorkovanja 44,1 kHz i 50,4 kHz. Frekvencija uzorkovanja od 44,056 kHz primjenjuje se u digitalnim magnetofonima koji se upotrebljavaju u magnetoskopima kao pomoćni uređaj za snimanje zvuka. Nešto niža frekvencija uzorkovanja primjenjuje se u magnetofonima s rotirajućom glavom.

Frekvencija uzorkovanja 50,4 kHz primjenjuje se u magnetofonima s mirnom glavom i longitudinalnim zapisom. Frekvencija 50,4 kHz i 44,1 kHz odnose se kao cjelobrojni omjeri 8:7, pa ih je moguće pretvarati jednu u drugu upotrebom

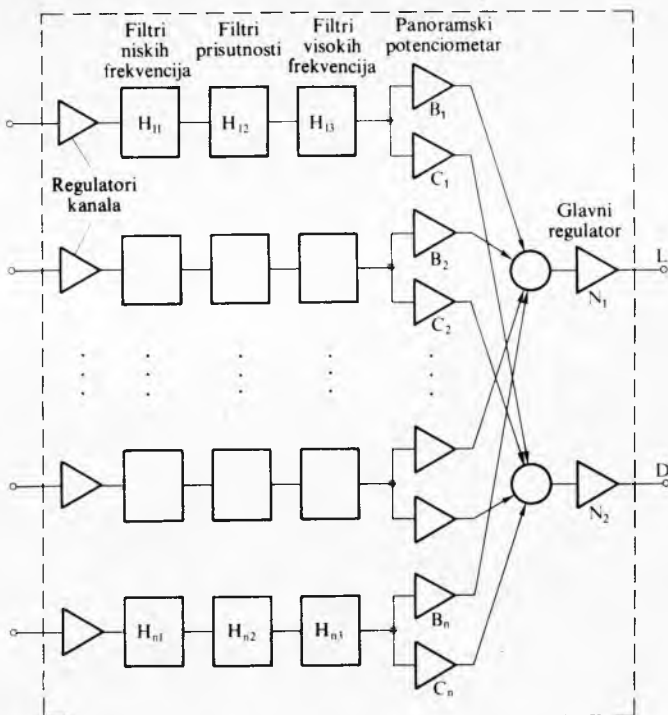
jednostavnog konvertora. Te frekvencije uzorkovanja odabrane su zbog kompatibilnosti s digitalnim gramofonom.

Digitalni magnetofon s rotirajućom glavom osniva se na tehnologiji magnetoskopa, tako da se ti uređaji uz neke zahvate mogu upotrijebiti i za digitalno snimanje zvuka. Široko frekvencijsko područje, sve do 20 kHz, postiže se velikom brzinom rotiranja magnetofonske glave. Tako se kod 32-kanalnog magnetofona postiže ukupna dinamika 80...90 dB, uz izobličenja manja od 0,05%. Pri tom se elektronički upravlja uvođenjem i vođenjem vrpce preko magnetofonske glave.

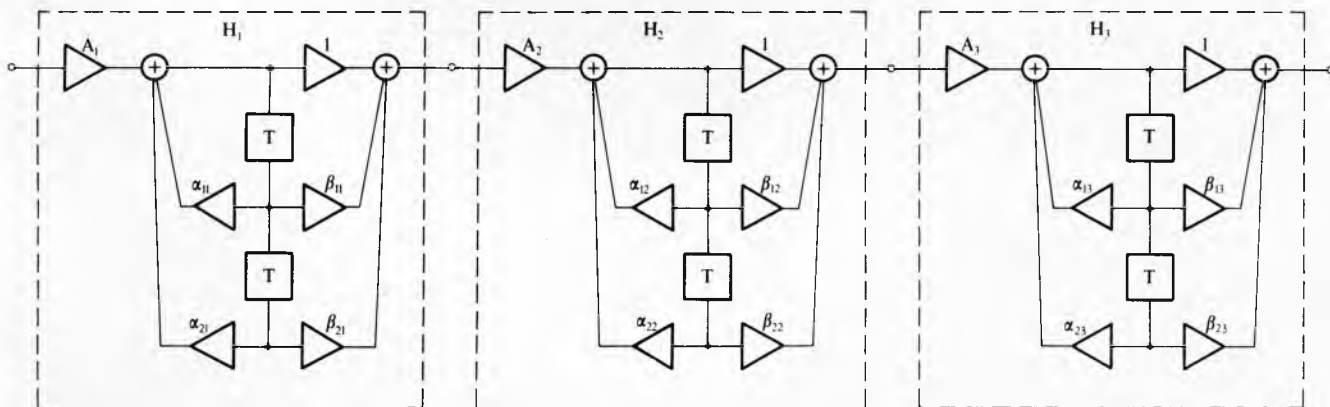
Digitalni magnetofoni s mirnom glavom pogodniji su kao profesionalni studijski uređaji jer je u njima mnogo lakše uvođenje vrpce, a time znači i jednostavnije rezanje i umetanje pojedinih dijelova vrpce pri montaži u studiju, gotovo jednako kao za analogni magnetofon.

Iskoristivost vrpce magnetofona s mirnom glavom je manja nego onog s rotirajućom glavom, zbog longitudinalnog zapisa za koji se mora upotrijebiti više tragova za snimanje i reprodukciju jednog tonskog kanala. Broj kanala digitalne snimke jest 2 do 32. Dinamika iznosi također 80...90 dB, uz izobličenja manje od 0,05% u frekvencijskom području do 20 kHz.

Digitalni kasetofon. Do danas je razvijen digitalni kasetofon s kompaktnom kasetom i mirnom feritnom glavom. Vrpca je metalna, širine 6,35 mm. Frekvencija je uzorkovanja 44,1 kHz, kvantizacija 16 bita, a vrijeme reproduciranja 1 sat. Brzina



Sl. 166. Blok shema digitalnog stola za miješanje



Sl. 167. Digitalni filtri drugog reda za oblikovanje frekvencijske karakteristike signala, H_1 niskofrekvencijski filter, H_2 filter prisutnosti, H_3 visokofrekvencijski filter, T transduktor

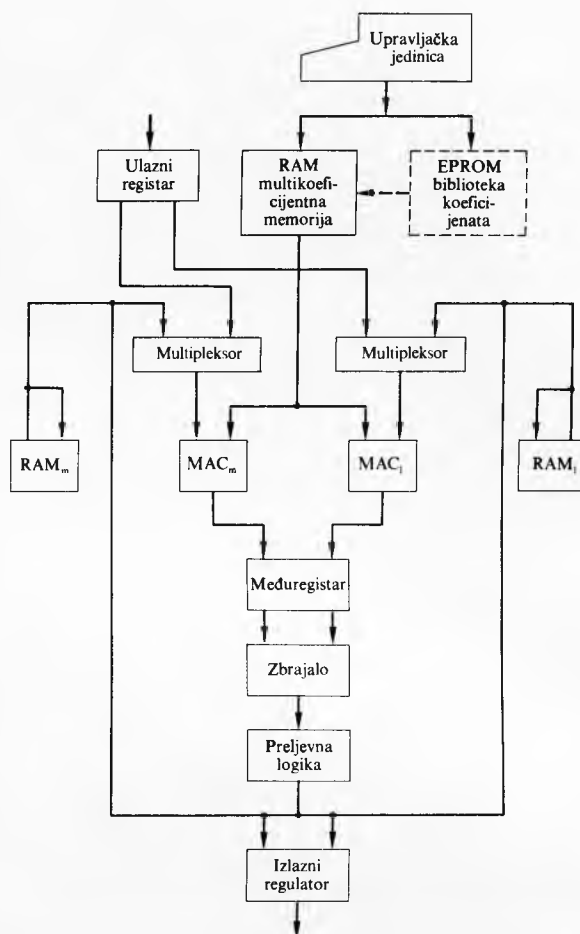
je vrpce 9,5 cm/s, a ima 12 tragova, 10 informacijskih i 2 upravljačka. Iako radi s relativno malom širinom vrpce i malom brzinom, digitalni kasetofon ima kvalitetu analognih profesionalnih uređaja, postiže se dinamika ~85 dB uz izobličenje ~0,05% u frekvencijskom području 20 kHz.

Digitalno procesiranje. U studijima koji su opremljeni digitalnim magnetofonima može se postići poboljšanje kvalitete snimke i digitalnim konačnim miješanjem, obradom i prijenosom. Tada otpada višestruko analognog-digitalno i digitalno-analognog pretvaranje signala. Nadalje, digitalnom se tehnikom mogu obaviti pojedini zahvati na signalu, kao što je kašnjenje signala, ili procesiranje složenog signala, bolje nego analognom tehnikom. Dodatno je poboljšanje i zbog prirode digitalnog signala, koji je sam po sebi programibilan te se može upotrijebiti digitalni procesor signala, čime cijeli sustav za snimanje i obradu signala postaje fleksibilniji.

Procesiranje se izvodi na digitalnom stolu za miješanje (sl. 166), a obavlja se regulacijom razine svakog od ulaznih modula, oblikovanjem spektra (regulacija niskih i visokih frekvencija, filter prisutnosti), miješanjem određenog broja kanala u stereo signal, te regulacijom panorame i konačnom glavnom regulacijom izlaznog signala. Posebno su za tu svrhu konstruirani brzi digitalni procesori koji omogućuju izvođenje svih operacija u stolu za miješanje za samo 20 μ s.

Frekvencijsko oblikovanje signala u svakom kanalu izvedeno je pomoću tri digitalna filtra drugog reda (sl. 167) s kojima se upravlja iz memorije.

Arhitektura procesora prikazana je na sl. 168, a glavni su blokovi: memorija EPROM koja sadrži sve potrebne koeficijente za upravljanje filterima i mješalima, memorija RAM sa stvarnim koeficijentima koji se upotrebljavaju pri procesiranju, a preneseni su iz biblioteke koeficijenata, multipleksori — akumulatori MAC za procesiranje najvažnijih i manje važnih riječi podataka. Pri digitalnom procesiranju pojavljuju se i mnogi problemi u vođenju signala, uzrokovani konačnim brojem koeficijenata, pojavom šuma i prelivnih oscilacija. Očekuje se da će u dogledno vrijeme većina tih problema biti riješena.



Sl. 168. Arhitektura procesora digitalnog tonskog signala



Dio suvremenog višekanalnog stola za miješanje s uređajima za digitalno snimanje i reproduciranje

LIT.: W. Meyer-Eppler, Elektrische Klangerzeugung. F. Dümmeler, Bonn 1949. — Ch. A. Culver, Musical Acoustics. Blakiston, Toronto 1951. — H. Simbriger, A. Zehelein, Handbuch der musikalischen Akustik. J. Habbel, Regensburg 1951. — E. H. Meyer, Musik im Zeitgeschehen. Henschel, Berlin 1952. — H. F. Olson, Musical Engineering. McGraw-Hill, New York 1952. — F. Winckel (Herausgeber), Klangstruktur der Musik. Radio-Foto-Kinotechnik, Berlin 1955. — H. Kunitz, Die Instrumentation. I Teil: Akustik. Breitkopf-Härtel, Leipzig 1956. — F. Canac (Editeur), Acoustique Musicale. CRNS, Paris 1959. — L. L. Beranek, Music, Acoustics and Architecture. John Wiley, New York 1962. — B. Chaitanya Deva, Psychoacoustics of Music and Speech. Music Academy, Madras 1967. — E. Zwicker, R. Feldtkeller, Das Ohr als Nachrichtenempfänger. Hirzel, Stuttgart 1967.

— H. V. Foerster, J. W. Beauchamp, Music by Computers. John Wiley, New York 1969. — H. Ising, Über die Klangerzeugung in Orgelpfeifen (Dissertation). Berlin 1969. — J. Backus, The Acoustical Foundation of Music. Murray, London 1970. — E. Leipp, Acoustique et musique. Masson, Paris 1971. — J. Meyer, Akustik und musikalische Aufführungspraxis. Das Musikinstrument, Frankfurt/Main 1972. — C. M. Hutchins (Editor), Musical Acoustics. Part I. Dowden, Stroudsburg/Penna 1975. — C. M. Hutchins (Editor), Musical Acoustics. Part II. Dowden, Stroudsburg/Penna 1976. — J. S. Rigden, Physics and the Sound of Music. John Wiley, New York 1977. — J. Webers, Tonstudientechnik. Franzis-Verlag, München 1980.

B. Somek