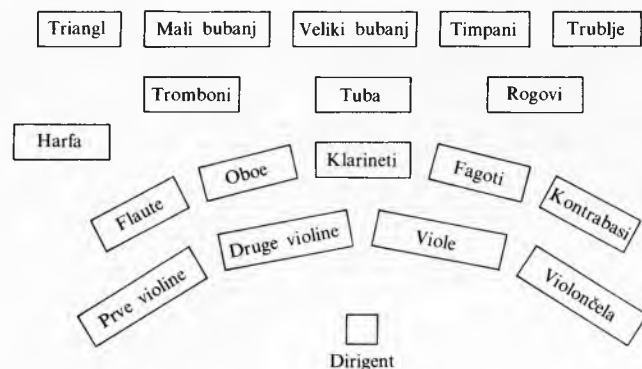
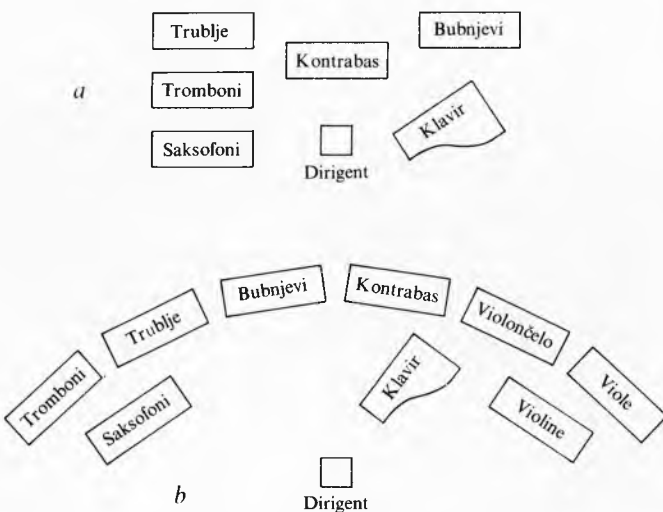


čiči, cjevasta zvana, kastanjete, trianql, ksilofon i čineli). Suvremeni orkestri mogu imati 70 do 120 izvođača a simfonijski orkestar može imati i druga glazbala kao glasovir, harfu i orgulje (sl. 158). Postoje različite postave orkestrara: njemački, američki, i varijante tih postava (sl. 159). Pri izvođenju operne, kazališne i oratorijske glazbe može biti 5 do 50 glazbenika.



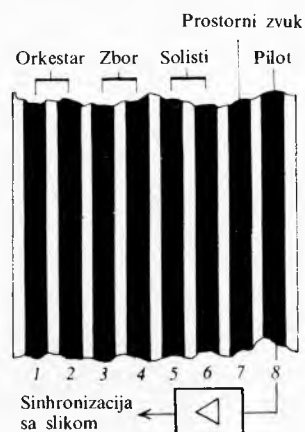
Sl. 158. Postava simfonijskog orkestra prema tzv. američkom načinu



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 tonoskog 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 tonoskog 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 tonoskog signala s dinamikom većom od 90 dB, b veoma malen faktor harmonijskog i intermodulacijskog izobličenja, c zane-marljivo malo kolebanje brzine vrtnje, d prelušavanje 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 tonoskog 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	65	55	60	90
Faktor izobličenja	0,5	1	1	0,05
Kolebanje brzine vrtnje	0,02	0,08	0,03	(zanemarljivo maleno)
Razina prelušavanja	45	30	30	90

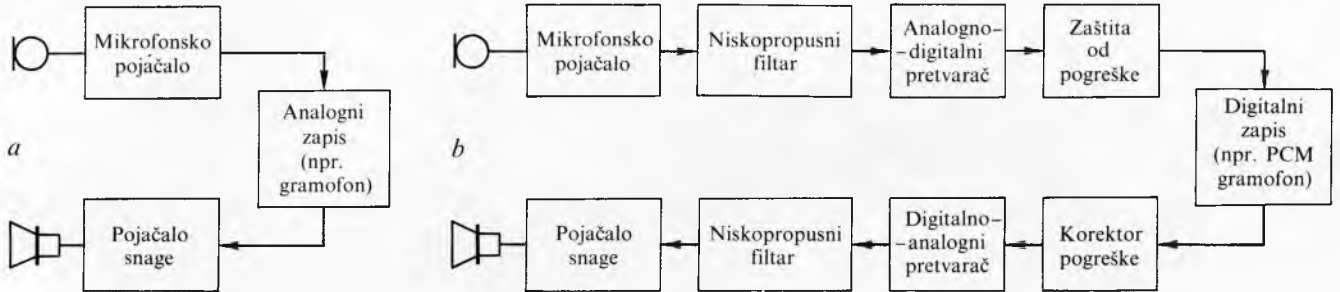
Digitalna obradba tonskog signala

U dosadašnjoj, tzv. *analognoj* obradbi tonskog 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 puštanjem 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.



Sl. 161. Blok-shema snimanja, ispisivanja i reprodukcije zvuka. a analogni sustav, b digitalni sustav

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 tonski signal.

PCM sustav za pretvaranje analognog tonskog signala u digitalni (sl. 161 b) sastoji se od analognog ulaza (mikrofonско pojačало), analogno-digitalnog pretvarača, stupnja za digitalno procesiranje ili zapisivanje, digitalno-analognog pretvarača i analognog izlaza (pojačало snage).

Kompleksni tonski 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 analogno-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

$$D = 20 \lg \frac{u}{u_s} = 20 \lg \frac{A}{\sqrt{2}d}, \tag{24}$$

odnosno, prema $A = Nd$,

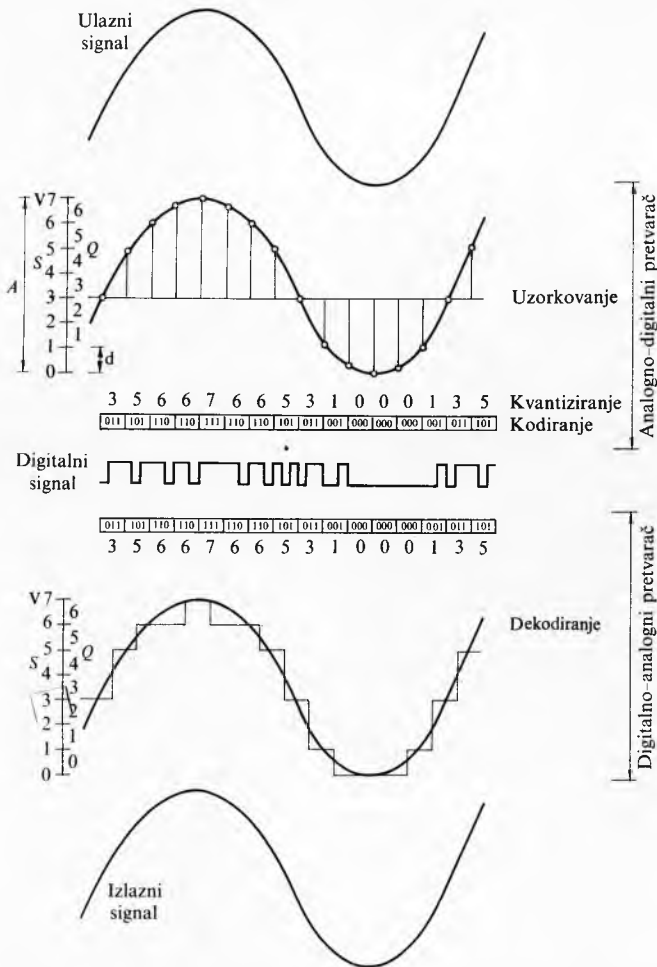
$$D = 20 \lg \frac{N}{\sqrt{2}} \approx 20 \lg N - 3 \text{ dB}. \tag{25}$$

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 30000 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-analogno 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 stepeniča 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 modulacijskom 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 magnetoskopu.

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.

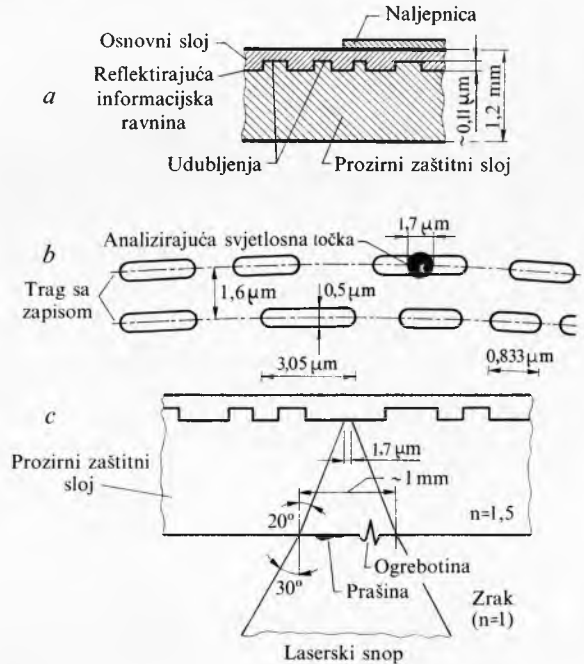
Do sada su se digitalni uređaji upotrebljavali samo u studentskoj tehnici, međutim, danas se na tržištu za široku potrebu, pojavljuju digitalni gramofoni s kompaktnom pločom (CD), a u najnovije vrijeme i digitalni kasetofoni. Nadalje, konstruirani su i ostali digitalni uređaji za obradbu tonskog signala: 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. Reprodukcijski ton 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 μm, 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

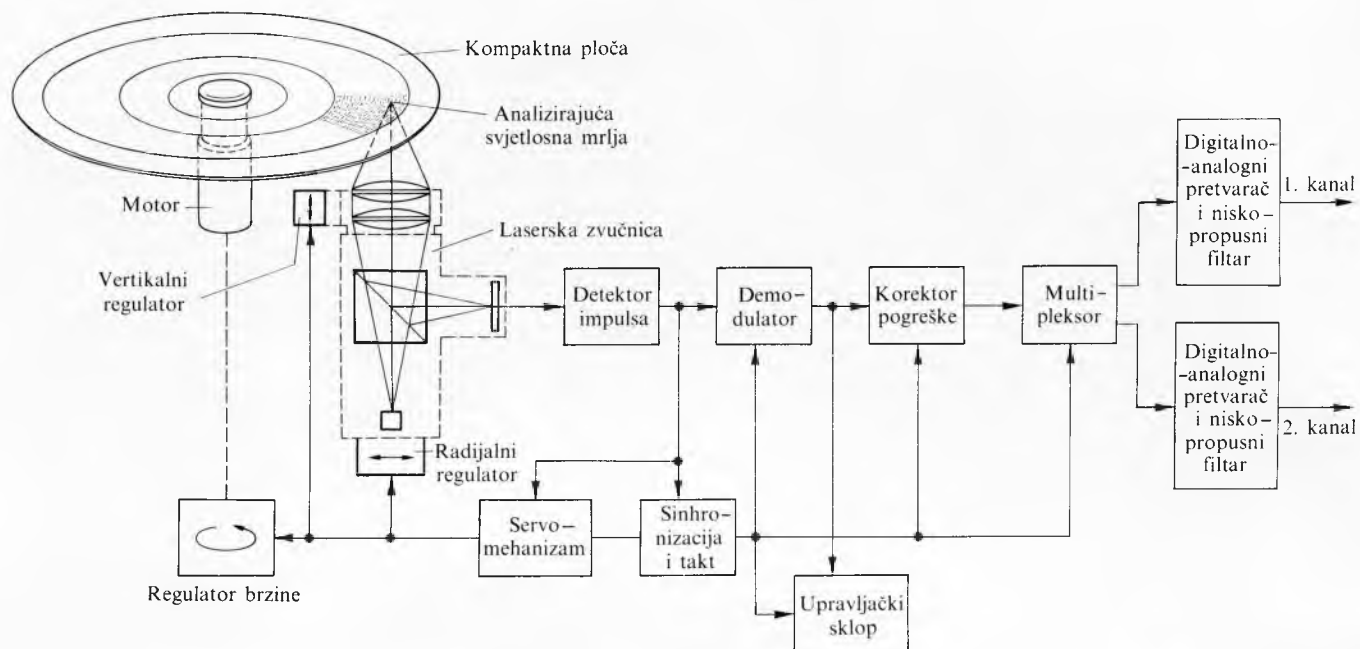
Zvuk se s takve ploče reproducira na posebnom, tzv. digitalnom laserskom gramofonu (sl. 164). Obodna brzina traga na ploči je konstantna, iznosi ~1,25 m/s. Brzina vrtnje ploče mora se zbog različitih promjera tragova mijenjati kontinuirano, i to od sredine prema obodu od 500·200 min⁻¹. (tabl. 13).

Tablica 13
OSNOVNI PODACI O DIGITALNOM GRAMOFONU ZA REPRODUKCIJU SA CD PLOČE

Vrijeme reproduciranja jedne strane	~60 min
Obodna brzina	~1,25 m/s
Valna duljina laserskog snopa	780 nm
Dubinska oština	4 μm
Broj kanala	2 ili 4
Kvantizacija (lineama)	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 μm. 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 μm, a širina udubljenja samo 0,5 μm.



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 nešistoće na ploči, jer je lećama omeđena dubinska oštrina na samo $2 \mu\text{m}$ (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 redosljed 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 3 500 uzastopno pogrešno primljenih bitova, što odgovara oštećenju traga na ploči dugačkom ~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. nalazanjem srednje vrijednosti amplitude između dvaju pravilno primljenih znakova, može se postići približna vrijednost pogrešno primljenog znaka. Tako se može rekonstruirati i više od 12 000 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

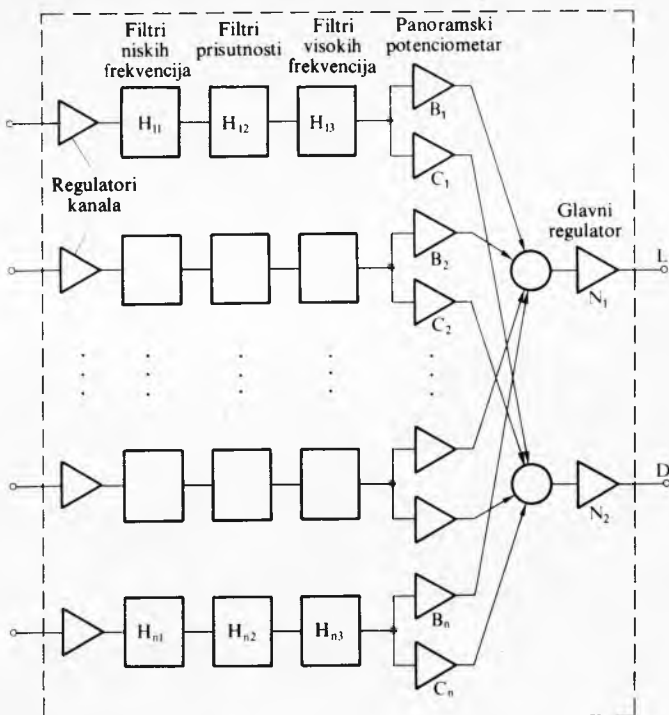
jednostavnog konvertora. Te frekvencije uzorkovanja odabrane su zbog kompatibilnosti s digitalnim gramofonom.

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.

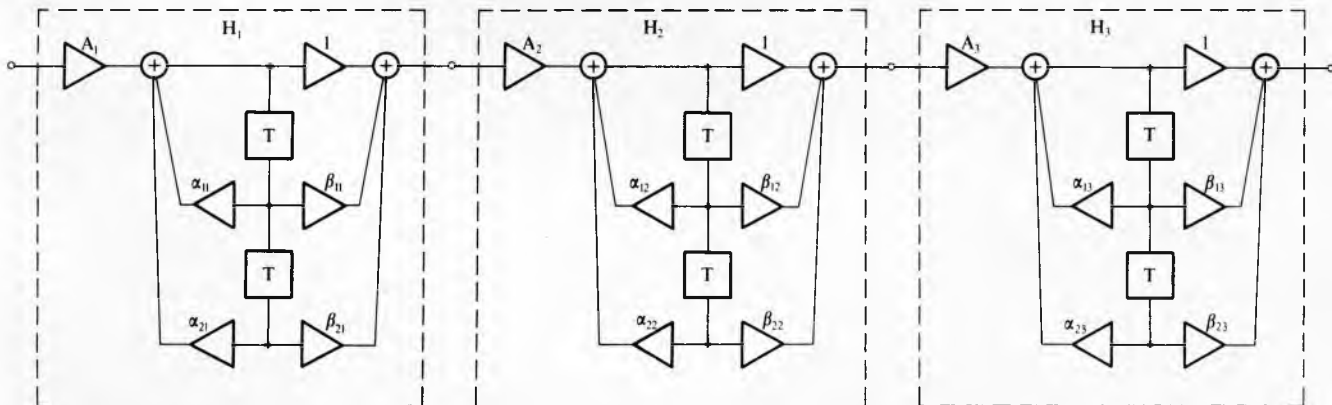
Digitalni magnetofoni s mirnom glavom pogodniji su kao profesionalni studijski uređaji jer je u njima mnogo lakše uvođenje vrpce, a time znači i jednostavnije rezanje i umetanje pojedinih dijelova vrpce pri montaži u studiju, gotovo jednako kao za analogni magnetofon.

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 izobličenje 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. H₁ niskofrekvencijski filtar, H₂ filtar prisutnosti, H₃ visokofrekvencijski filtar, T transduktor

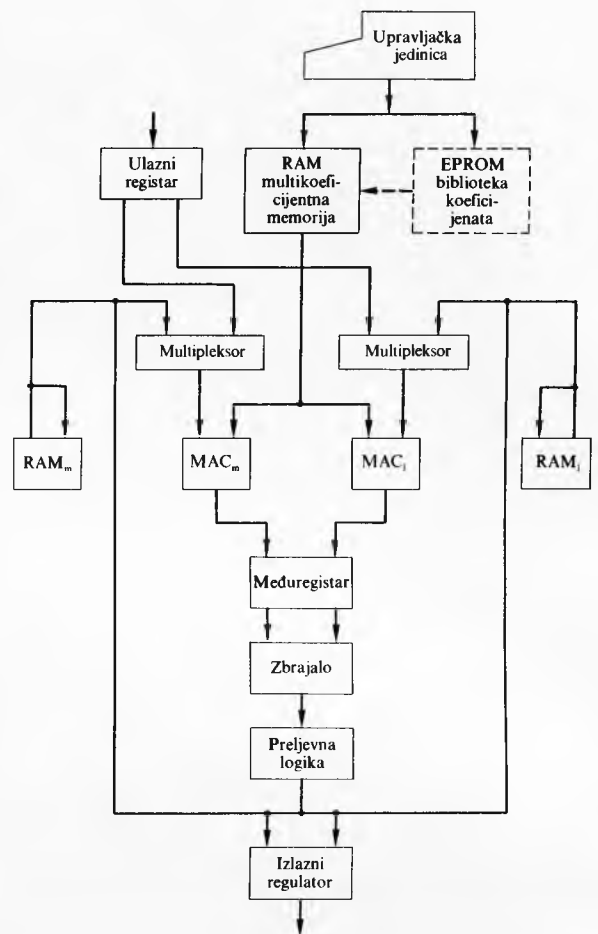
je vrpce 9,5 cm/s, a ima 12 tragova, 10 informacijskih i 2 upravljačka. Iako radi s relativno malom širinom vrpce i malom brzinom, digitalni kasetofon ima kvalitetu analognih profesionalnih uređaja, postiže se dinamika ~85 dB uz izobličenje ~0,05% u frekvencijskom području 20 kHz.

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 analognodigitalno i digitalno-analognopretvaranje 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. Dümler, Bonn 1949. — Ch. A. Culver, Musical Acoustics. Blakiston, Toronto 1951. — H. Simbriger, A. Zehlein, Handbuch der musikalischen Akustik. J. Habel, 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. Kumitz, 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