I. Eiskop A. Sillart

HELITEHNIKA



I. Eiskop, A. Sillart

Helitehnika

«Valgus» · Tallinn 1973

652
E 41

UDK 534.86

Kaane kujundanud T. Aru

Raamatus antakse ülevaade ruumide akustilisest kujundamisest ja helivõimendusaparatuuriga varustamisest. Lähemalt kirjeldatakse mikrofonide, valjuhääldite, filtrite, mikserite ja reverberaatorite tööpõhimõtet ja kasutamist. Samuti käsitletakse magnetilist ning mehaanilist helisalvestust.

Teos on mõeldud kogenud raadioamatööridele ja heliaparatuuri teenindavale personalile, kel on põhiteadmisi elektro- ja raadiotehnikast. Samuti on ta kasutatav kesk- ja kõrgemates õppeasutustes vastava õppeaine õppimisel.

Электроакустика и озвучание помещений. Эйскоп И., Силларт А. 1973.

В книге даются необходимые сведения для акустического оформления помещений и для обставления их аппаратурой звукоусиления. Подробно описан принцип работы и применение электроакустических и звукозаписывающих устройств.

Издание рассчитано на широкий круг радиолюбителей, имеющих знания по электро- и радиотехнике, а также на персонал, эксплуатирующий аппаратуру звукозаписи. Книга может также найти применение в средних и высших учебных заведениях.

Илл. 198, табл. 25, библ. 139.

TARTU ÜLIKOOLI
RAAMATUKOGU

© Kirjastus «Valgus», 1973

3—4—3
58—73

Eessõna

Helitehnika all mõeldakse käesolevas raamatus ruumide akustilist kujundamist ja nende varustamist helivõimendus- ja salvestusaparatuuriga. Teoreetilisteks alusteks helitehnikale on nii üldine akustika, mis uurib helilainete tekitamist, levikut ja mõõtmist, kui ka elektroakustika, mis tegeleb helilainete elektromehaanilise muundamise küsimustega, ning füsioloogiline akustika, mis käsitleb heli subjektiivset tajumist inimese poolt.

Teos on mõeldud raadioamatööridele ja heliaparatuuri teenindavale personalile, kel on eelteadmisi füüsika akustikaosast ja elektro- ning raadiotehnikast keskkoolikursuse ulatuses, kuid on kasutatav ka kesk- ja kõrgemais eriõppeasutustes vastava õppeaine õppimisel.

Raamatu piiratud mahu tõttu on üldisest ja füsioloogilisest akustikast lühidalt toodud vaid põhialused, mis on hädavajalikud helitehnika mõistmiseks. Eeldatakse, et lugeja on tuttav varemilmunud sellealase eestikeelse kirjandusega või tutvub sellega käesoleva raamatu lugemise jooksul. Helitehnikast kõige üldisema ja sissejuhatava ülevaate saamiseks on väga soovitatav läbi lugeda H. Pedusaare värvikalt kirjutatud populaarteaduslik «Helide maailmas» (ilmus kirjastuse «Valgus» väljaandel 1966. a.).

Raamatus käsitletakse küsimusi, mis on välja kristalliseerunud autorite kauaaegses tegevuses ringhäälingus ja vastavate õppeainete lugemisel Tallinna Polütehnilises Instituudis.

Et hõlbustada raamatu kasutajal käsitletud küsimuste detailsemat uurimist, on tekstis rohkesti viiteid (nurksulgudes) vastavatele allikmaterjalidele. Viimaste loetelu on toodud raamatu lõpus tähestikulises järjekorras.

Kasutatud rahvusvahelise mõõtühikute süsteemi (SI) elektriliste, magnetiliste ja akustiliste mõõtühikute kohta on andmed toodud raamatu lisasse paigutatud tabelites. Ka on raamatu lõpus toodud kasutatud tähiste loetelu ja aineregister.

Autorid

Sisukord

1. HELI ISELOOMUSTAVAD SUURUSED

1.1. Helirõhk ja õhuosakeste võnkekiirus 7
1.2. Heliintensiivsus ja helienergia tihedus 9
1.3. Helivaljus ja dünaamiline kuuldeala 10
1.4. Mürade mõju kõne arusaadavusele 12
1.5. Heliallika lokaliseerimine 13
1.6. Heliallikate sagedusala 13
1.7. Heliallikate dünaamikapiirkond 14
1.8. Heliallikate statistilis-dünaamilised spektrid 16
1.9. Heliülekande loomutruudus ja selle moonutused 17

2. RUUMIAKUSTIKA

2.1. Heli levimine ruumis 24
2.2. Ruumi reverberatsiooniaeg 26
2.3. Reverberatsiooniaeg ühendatud ruumides 27
2.4. Optimaalne reverberatsiooniaeg 28
2.5. Ruumi resonantsisagedused 29
2.6. Heli difuusses ruumis 31
2.7. Ruumi optimaalne maht 31
2.8. Helineeldematerjalid 32
2.9. Ruumi heliisolatsioon 37
2.10. Ruumi müranivoo arvutamine 40

3. ELEKTROAKUSTIKA

3.1. Akustiliste ja elektriliste suuruste võrdlus 41
3.2. Elektromehaaniline muundur kui neliklemm 54
3.3. Induktiivsed ja mahtuvuslikud muundurid 56
3.4. Kera- ja kolbkiirgurid. Ruupor 62

4. MIKROFONID

4.1. Mikrofon kui neliklemm 69
4.2. Helirõhule või selle gradiendile tundlik mikrofon 70
4.3. Liitmikrofonid 73

4.4. Stereomikrofonid 76
4.5. Mikrofonide klassifikatsioon elektromehaanilise muunduri järgi . . 78
4.6. Dünaamilised mikrofonid 78
4.7. Kardioidkarakteristikuga dünaamiline mikrofon 81
4.8. Lintmikrofonid 82
4.9. Kondensaatormikrofonid 85
4.10. Kasutatavamate stuudiomikrofonide andmeid 90
4.11. Piesoelektrilised mikrofonid 92
4.12. Süsimikrofonid 93
4.13. Pooljuhtmikrofon 93
4.14. Mikrofoni tuule- ja vihmakaitse 94

5. VALJUHÄÄLDID

5.1. Valjuhääldi kui neliklemm 97
5.2. Elektrodünaamiline koonusvaljuhääldi 100
5.3. Ruuporvaljuhääldid 116
5.4. Püstik- ja radiaalkõlarid 120
5.5. Raadiovõrgu abonentvaljuhääldid 124
5.6. Kinode unifitseeritud heliaparatuur «Zvuk» 127

6. HELIVÕIMENDUS RUUMIS JA VÄLJAKUL

6.1. Ruumi akustiline iseloomustus 131
6.2. Helitaseme määramine ruumis ja kõlarite paigutus 132
6.3. Akustiline tagasisidestus ja selle vältimine 133
6.4. Helivõimendus väljakul 134

7. ELEKTROAKUSTILINE HELIKANAL

7.1. Elektroakustiliste helikanalite põhitüübid ja nende tasemediagrammid 138
7.2. Atenuaatorid 140
7.3. Mikserseadmed 146
7.4. Stereomikserid 149
7.5. Filtrid 150
7.6. Mikrofonide paigutusest 153
7.7. Helisignaali reguleerimine ja kontrollimine 154
7.8. Sümmeetriline ja ebasümmeetriline liin. Varjestamine ja maandamine helitehnikas 158
7.9. Foonika helipuldid 163
7.10. Piirajad 167

8. MAGNETILINE HELISALVESTUS

8.1. Magnetofoni tööpõhimõte 170
8.2. Kustutus- ja salvestusprotsess 174
8.3. Magnetofonilint 180
8.4. Magnetofonilindi demagneetumine 184
8.5. Taasestusprotsess 188

8.6. Magnetofonipead 190
8.7. Magnetofoni võimendite sageduskarakteristiku korrigeerimine ja reguleerimine 195
8.8. Magnetofon «Daina» 199
8.9. Diktofon «Elektron» 202

9. MEHAANILINE HELISALVESTUS

9.1. Mehaanilise helisalvestuse tehnika 204
9.2. Vaosammu ja taasestusnõela mõõtmed 205
9.3. Lõiketera võnkeamplituud ja -kiirus. Helilõike sageduskarakteristik . 207
9.4. Heliplaadi taasestus 211
9.5. Heliplaatide hooldamine 215

10. REVERBERAATORID

10.1. Kajaruumreverberaator 218
10.2. Magnetlintreverberaator 220
10.3. Magnettrummelreverberaator 222
10.4. Plaatreverberaator 223
10.5. Vedrureverberaator 227
10.6. Ambiofoonia 228

LISAD

1. SI mõõtühikud elektriliste ja magnetiliste suuruste mõõtmiseks . . . 231
2. SI mõõtühikud akustiliste suuruste mõõtmiseks 232
3. Helineeldumistegurid 233
4. Mitmesuguste piirete keskmine heliisolatsioonivõime 234
5. Detsibellides väljendatud helirõhule vastav rõhk Pa 235
Kirjandus 236
Kasutatavamad tähised 240
Aineregister 241

1.

Heli iseloomustavad suurused

Füüsikast [49, 52] on teada, et heliks nimetatakse kõiki elastses keskkonnas (õhk, vesi, metall, kivimid jne.) levivaid mehaanilisi võnkumisi. Kitsamas mõttes mõeldakse heli all võnkumisi, mida tajub inimese kõrv, s. o. võnkesagedusega umbes 16 ... 20 000 Hz. Kuuldavat heli nimetatakse ka hääleks. Võnkumised sagedusega alla 16 või üle 20 000 Hz on vastavalt infra- või ultraheli.

Helilaine õhus kujutab endast vahelduvaid hõrendusi ja tihendusi, mis levivad kiirusega $c_0 = 340$ m/s.[1]

Siinuselise võnkumise puhul vastab kõige madalamale kuuldavale helile sagedusega $f_m = 16$ Hz lainepikkus õhus $\lambda_m = c_0 : f_m = 340 : 16 = 21$ m ja kõige kõrgemale ($f_k = 20\,000$ Hz) — $\lambda_k = c_0 : f_k = 340 : 20\,000 = 0{,}017$ m $= 1{,}7$ cm.

Kui leviva helilaine front on tasapinnaline, on tegemist nn. *tasapinnalise lainega* e. *tasalainega*. Kerapinnalise frondiga helilaine on nn. *keralaine*.

Ruumi osa, milles levib helilaine, nimetatakse *heliväljaks*.

1.1. HELIRÕHK JA ÕHUOSAKESTE VÕNKEKIIRUS

Helilaine või -välja vahelduvates hõrendustes ja tihendustes on õhu rõhk vastavalt madalam või kõrgem, võrreldes atmosfääri e. staatilise rõhuga (keskväärtusega). Rõhu erinevust keskväärtusest nimetatakse *helirõhuks* ja selle mõõtühikuks on rahvusvahelises

[1] See on heli kiirus õhu temperatuuril 290 K (17 °C) ja normaalrõhul 101,325 Pa (760 mm Hg) ning kasutatav tavalistes tehnilistes arvutustes. Täpsetel uurimistel tuleb arvestada, et heli kiirus on võrdeline ruutjuurega rõhust ja absoluutsest temperatuurist.

süsteemis (SI) paskal (Pa); 1 Pa=N/m² (N — njuuton, jõuühik rahvusvahelises süsteemis[1]; 1 N=1 kg·m/s²=10⁵ dyn). CGS-süsteemis on helirõhu mõõtühikuks nn. akustiline baar:

1 akbar=1 dyn/cm²=0,1 Pa.

Siinuselise helilaine puhul võnguvad õhuosakesed siinuseliselt oma keskasendi ümber. Tasapinnalise laine puhul toimub see vastavalt võrrandile [52]

$$s = s_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) = s_0 \sin (\omega t - kx), \tag{1.1}$$

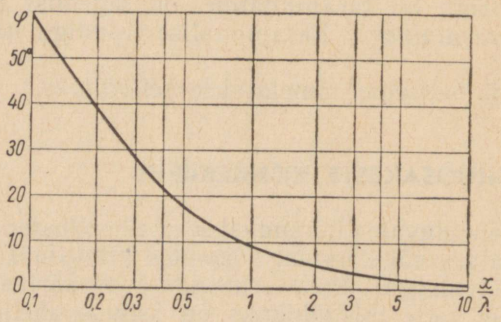
kus s — võnkeamplituud, $\omega = 2\pi f$ — nurksagedus, t — aeg, x — kaugus piki levimissuunda, c — laine levimiskiirus, $k = \omega/c = 2\pi f/c = 2\pi/\lambda$ — lainearv. Selle põhjal *õhuosakese võnkekiirus* kui paigutuse e. nihke tuletis aja suhtes

$$v = \frac{ds}{dt} = \omega s_0 \cos \omega \left(t - \frac{x}{c} \right) = \omega s_0 \cos (\omega t - kx). \tag{1.2}$$

Füüsikakursuse akustikaosas [52] näidatakse, et tasapinnalises laines e. tasalaines on rõhk p ja osakeste võnkekiirus faasis, kusjuures nende suhe on konstantne:

$$\frac{p}{v} = \varrho c, \tag{1.3}$$

kus ϱ — keskkonna tihedus. Valem on analoogiline elektrotehnikas tuntud Ohmi seadusega $U/I = R$, mistõttu korrutist ϱc nimetatakse keskkonna *akustiliseks takistuseks*. Tehnilistes arvutustes võetakse õhu akustiliseks takistuseks $\varrho_0 c_0 = 1{,}23 \cdot 340 = 418$ kg/(m²·s).



Joon. 1.1. Helirõhu ja võnkekiiruse vaheline faasinihe keralaines

[1] Lähemaid andmeid SI kohta on toodud kirjanduses [62] ja käesoleva raamatu lisades 1 ning 2.

Et tasalaines on rõhk ja võnkekiirus faasis, siis ruumipunktides, kus helirõhk on maksimaalne, on ka õhuosakeste kiirus maksimaalne ning laine levimissuunaline. Helirõhu nullpunktis on kiirus null ja rõhu miinimumkohtades on õhuosakeste kiirus vastassuunaline ning maksimaalne.

Keralaine puhul on rõhk ja võnkekiirus faasis nihutatud nurga φ võrra (joon. 1.1) ning rõhu ja võnkekiiruse amplituudide suhe [132]

$$\frac{p_m}{v_m} = \varrho c \cos\varphi = \varrho c \frac{kx}{\sqrt{1+(kx)^2}}, \tag{1.4}$$

kus x — kaugus keralaine tsentrist ja k — lainearv.

1.2. HELIINTENSIIVSUS JA HELIENERGIA TIHEDUS

Keskkonnas leviv helilaine kannab endaga energiat levimissuunas.

Heliintensiivsuseks **I** nimetatakse energiahulka, mida kannab helilaine ajaühiku jooksul läbi ühikpinna, mis on risti laine levimissuunaga. Mõõtühikuks on $J/(s \cdot m^2) = W/m^2 = 100\ \mu W/cm^2 = 10^3\ erg/(s \cdot cm^2)$. Füüsikas tuntud Umov-Pointingi seaduse põhjal arvutatakse heliintensiivsus kui helirõhu ja võnkekiiruse korrutise keskväärtus:

$$\mathbf{I} = \frac{1}{T}\int_0^T pv\,dt = p_{ef}v_{ef}\cos\varphi = \frac{p_{ef}^2}{\varrho c}\cos\varphi, \tag{1.5}$$

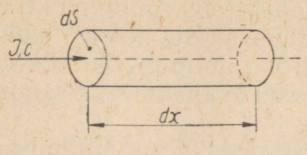
kus p_{ef}, v_{ef} — helirõhu ja võnkekiiruse efektiivväärtused, φ — faasinihe rõhu ja võnkekiiruse vahel. Valem on analoogiline elektrotehnikast tuntud võimsuse valemiga $P = UI\cos\varphi$. Tasalaines $\varphi = 0$ ja heliintensiivsus $\mathbf{I} = p_{ef}v_{ef}$.

Helienergia tihedus on helivälja energia ruumalaühiku kohta. Mõõtühikuks on $J/m^3 = 10\ erg/cm^3$ *. Tasapinnalise helilaine energiatiheduse arvutamiseks vaatleme silindrilist ruumiosa, mille pikkus laine levimise suunas olgu dx ja ristlõikepind dS (joon. 1.2). Sisenegu silindrisse otsapinna dS kaudu kiirusega c helilaine intensiivsusega **I**. Levides kiirusega c täidab helilaine silindri aja $t = dx/c$ jooksul energiahulgaga $A = \mathbf{I}t\,dS$, millest helienergia tihedus silindris (ruumalaga $V = dx\,dS$)

$$\mathbf{E} = \frac{A}{v} = \frac{\mathbf{I}t\,dS}{dx\,dS} = \frac{\mathbf{I}}{c} = \frac{p_{ef}^2}{\varrho c^2}. \tag{1.6}$$

---

* J — džaul; 1 J = 1 N · m = 10^7 ergi.



Joon. 1.2. Helienergia tiheduse selgituseks

Valem kehtib ka keralaine puhul, kui vaadeldav ruumala on küllalt väike, võrreldes lainefrondi kõverusega.

Helienergia tihedust on otstarbekas kasutada siis, kui heliväli koosneb ruumi seintelt ja teistelt pindadelt peegeldunud rohkearvulistest peegeldunud lainetest, mis liiguvad kõikvõimalikes suundades. Helienergia tihedus arvutatakse siis resulteeriva helirõhu kaudu, mis vaadeldavas ruumipunktis on üksikute peegeldunud lainete helirõhkude summa ning on mõõdetav vastava nn. mõõtemikrofoniga (vt. § 4.9).

1.3. HELIVALJUS JA DÜNAAMILINE KUULDEALA

Selleks et helisagedusega laine tekitaks heliaistingu, peab helilaine intensiivsus kõrva väliskuulmekäigu avas ületama teatud minimaalse suuruse, mida nimetatakse *kuuldeläveks*. Kuuldelävi sõltub helisagedusest ja inimese vanusest. 1000 Hz juures on inimese kuuldelävi keskmiselt $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2 ($p_{ef0} = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa; $E_0 = 3 \cdot 10^{-15}$ J $\cdot$ m^3), mis on võetud heliintensiivsuse (ja helirõhu või helienergia tiheduse) standardseks nullnivooks.

Väga suure intensiivsusega heli tekitab kõrvas valutunde. Sagedusel 1000 Hz algab valutunne heliintensiivsusel 100 W/m^2, mis on nn. *standardne valulävi.*

Füsioloogilised uurimused [52] näitavad, et inimese poolt tajutava *helivaljuse* L[1] suurenemine mingi ΔL võrra on sagedusel 1000 Hz võrdeline heliintensiivsuse I suhtelise suurenemisega:

$$\Delta L = \alpha \Delta I / I, \tag{1.7}$$

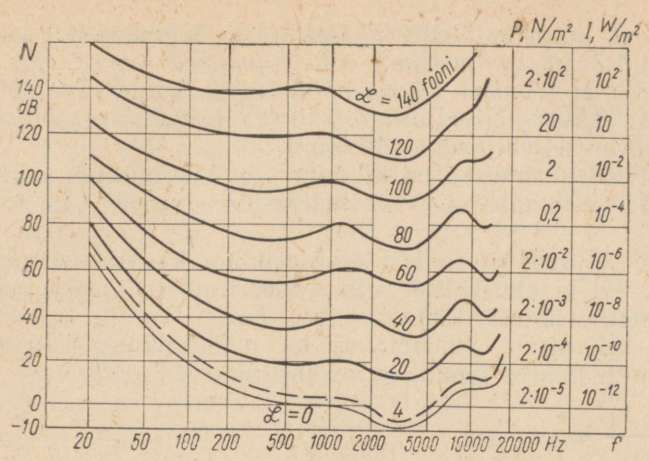
kus α — mingi konstant. Aistingu selline sõltuvus ärritavast energiahulgast on iseloomulik bioloogilistele süsteemidele ning tuntud Weber-Fechneri seadusena.

Minnes üle diferentsiaalkujule, saadakse $dL/dI = \alpha/I$, mille lahend on teatavasti [58]

$$L = \alpha \ln \frac{I}{I_0} = 0{,}4343\alpha \lg \frac{I}{I_0}. \tag{1.8}$$

Kui valida tegur α nii, et $0{,}4343\alpha = 10$, saadakse tajutav helivaljus mittesüsteemilistes akustilistes mõõtühikutes — foonides [62].

[1] L — esimene täht ingliskeelsest sõnast *loudness* (eesti k. valjus).



Joon. 1.3. Tajutava helivaljuse **L** sõltuvus helinivoost *N*

Helivaljus sagedusel 1000 Hz

$$\mathbf{L}_{1000} = 10 \lg \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{I}_0} \text{ fooni.} \tag{1.9}$$

Mingi teise sagedusega heli valjuse määramiseks kasutatakse nn. audiomeetrit, kus kuulmise teel võrreldakse tundmatu heli poolt põhjustatud heliaistingu tugevust etalonheliga 1000 Hz. Viimase tugevus ehk nivoo on teada ja seda reguleeritakse kuni aistingute subjektiivse võrdsustumiseni. Mõõdetava heli valjus võrdub siis etalonheli valjusega.

Inimese kuulmistaju logaritmilise iseloomu tõttu väljendatakse heli iseloomustavaid suurusi sageli mitte absoluutsetes, vaid suhtelistes logaritmilistes ühikutes — detsibellides (dB) — standardsete nullnivoode suhtes. Siis helinivoo

$$N = 10 \lg \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{I}_0} = 10 \lg \left(\frac{p_{ef}}{p_{ef_0}} \right)^2 = 20 \lg \frac{p_{ef}}{p_{ef_0}} =$$

$$= 10 \lg \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{E}_0} \text{ dB.} \tag{1.10}$$

Vastavateks ümberarvutusteks on otstarbekas kasutada lisas 5 toodud tabelit.

Detsibellide kasutamisel on otstarbekas meeles pidada, et helirõhu *p* kahekordsele muutusele vastab helirõhu nivoo muutus 6 dB võrra ja kümnekordsele muutusele vastab nivoo muutus 20 dB võrra. Heliintensiivsuse **I** ja helienergia tiheduse **E** kahe- või kümnekordsele muutusele vastab aga nende nivoo muutus kolme või kümne detsibelli võrra.

Helivaljuse **L** sõltuvust tema nivoost *N* ja sagedusest *f* kujutavad joonisel 1.3 nn. *samavaljuse* ehk *isofoonsed jooned* (iga 20 fooni järel). Samal joonisel 1.3 on näidatud ka kuuldeläve sõltuvus sagedusest (kõver helivaljusega 0 fooni) ja valuläve sõltuvus sagedusest (kõver helivaljusega 140 fooni).

Füsioloogilised uurimused on näidanud, et heli muutub subjektiivselt 2 korda valjumaks siis, kui helivaljus suureneb 10 fooni võrra.

Helivaljuse sõltuvus nivoost *N* leiab eelkõige kasutamist müramõõturite [56, 69] ja akustiliselt kompenseeritud helitugevusregulaatorite konstrueerimisel [126].

Tajutavat helivaljust mõõdetakse ka mõõtühikutes *soonides* (tähis son), millede seos foonidega on järgmine [57, 132]:

$$S = 2^{\frac{L-40}{10}} \text{ son.} \qquad (1.11)$$

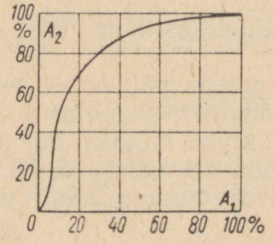
Valjusele 1 son vastab nivoo 40 fooni (tasane jutukõmin). Valjus soonides suureneb kaks korda iga 10 fooni kohta, mis on täielikus kooskõlas füsioloogilise aistinguga.

Kõrvalised mürad ja helid suurendavad kuuldeläve. Seda nimetatakse nõrga heli *maskeerimiseks* tugevama poolt.

Tuleb lisada, et täpsemate mõõtmiste põhjal pole kuuldeläveks mitte helivaljus 0 fooni, vaid 4 fooni [10, 132] (kriipsjoon joonisel 1.3).

1.4. MÜRADE MÕJU KÕNE ARUSAADAVUSELE

Mürade mõjul väheneb kõne arusaadavus, mida mõõdetakse nn. artikulatsiooniliste katsetega, kus müra taustal loetakse kuulajatele ette silpe või sõnu. Arusaadavuseks *A* nimetatakse õigesti vastuvõetud silpide või sõnade arvu protsentides. Seejuures ilmneb, et aju analüüsivõime tõttu on sõnade arusaadavus (A_2) suurem kui seoseta silpidel (A_1). Vastav empiiriline seos on toodud joonisel 1.4. Kõne arusaadavus on rahuldav, kui $A_1 = 70 \ldots 75\%$, ja hea, kui $A_1 \gg 85\%$. Fletcheri ja Holti poolt tehtud katsete põhjal [132] on arusaadavus $A_1 \approx 80\%$, kui kõne keskmine nivoo ületab 20 dB võrra müranivoo, mida tuleb arvestada helivõimendusseadmete projekteerimisel kõrge müranivooga ruumidesse (lennu- ja raudteejaamade ootesaalid) või väljakutele (staadionid jms.).



Joon. 1.4. Seos silpide A_1 ja sõnade A_2 arusaadavuse vahel

1.5. HELIALLIKA LOKALISEERIMINE

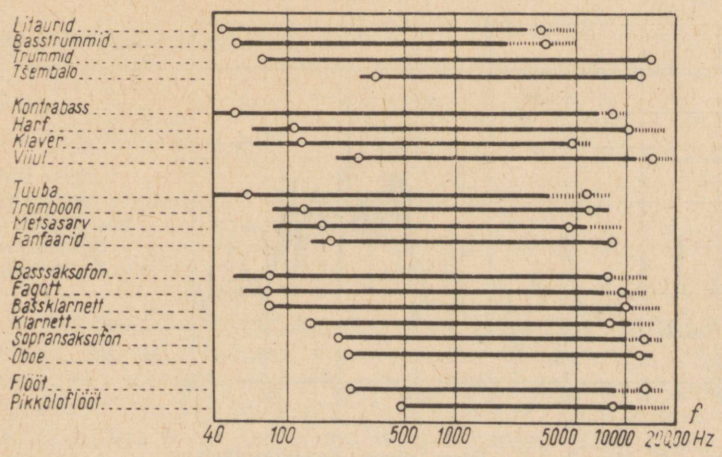
Inimene, kuulates kahe kõrvaga, tajub heli saabumissuunda ning saab teatava ettekujutuse heliallika asukohast. Kui heliallikas ei asu otse kuulaja ees, siis helivõnked jõuavad ühte kõrva varem, teise hiljem ning pea ekraneeriva mõju tõttu erinevad ka tugevuselt ning spektraalse koostise poolest. Madalatel sagedustel määrab suuna signaali hilinemine (faasinihe), kõrgetel — erinev tugevus. Taolist suunataju nimetatakse *binauraalefektiks*. Suuna määramise täpsus on 3...4°, millele vastab hilinemisaeg ca 0,03 ms. Kui heliallikas asub kuulaja taga või üleval pea kohal, on täpsus palju väiksem.

Tänu binauraalefektile saab kuulaja kontserdisaalis ruumilise mulje tema ees poodiumil laiuvast orkestrist ja võib kuulmise teel määrata isegi üksikute pillirühmade asukoha. Ruumiline efekt läheb aga kaduma tavalise heliülekande puhul ühe mikrofoni ja ühe valjuhääldiga (ühekanaline e. monofooniline ülekanne).

Ruumilise mulje säilitamiseks kasutatakse kahekanalilist stereofoonilist ülekannet, kus kummaski kanalis on omaette mikrofon ja valjuhääldi.

1.6. HELIALLIKATE SAGEDUSALA

Iga muusikariista helis on peale põhitooni e. esimese — harmoonilise veel terve rida *ülemtoone* e. kõrgemaid harmoonilisi ning muusikariistale iseloomulikke mürasid (õhujoa kahin puhk- ja vilepillides, akustilised löögid klappide avamisel-sulgemisel jne.).



Joon. 1.5. Muusikariistade sagedusalad

Kasutatavamate muusikariistade sagedusalad on toodud joonisel 1.5 [87]. Ringiga on märgitud piirsagedused, millest üles- või allapoole asuvate sageduste äralõikamist enamik kuulajaid (80%) tajub moonutusena instrumendi helis. Kriipsjoonega on tähistatud ülalnimetatud iseloomulike mürade sagedused.

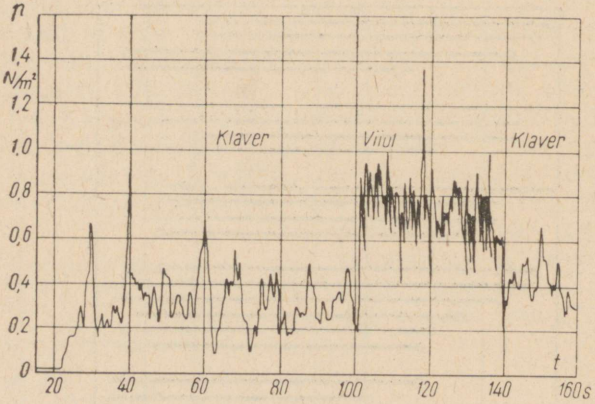
On näha, et muusika loomutruuks ülekandeks tuleb üle kanda sagedusi 40 ... 15 000 Hz.

1.7. HELIALLIKATE DÜNAAMIKAPIIRKOND

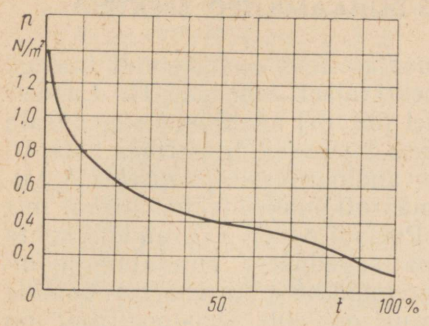
Inimkõrv omab teatud inertsi: tajutav helitugevus saavutab oma lõpliku väärtuse umbes 0,2 s jooksul. See on nn. kõrva adaptsioon ehk kohandumine valjusele.

Kõne või muusika tugevust sõltuvalt ajast registreeritakse nn. nivoomõõturitega. Need koosnevad mõõtemikrofonist, võimendist, detektorist e. mõõtealaldist ja paberlindile kirjutavast ostsillograafist. Detektori ja ostsillograafi resulteeriv ajakonstant $\tau \approx 0{,}2$ s. Joonisel 1.6 on toodud nivoo ostsillogramm (2 minutit 40 sekundit Beethoveni sonaadist viiulile ja klaverile sol-minoor op. 96) [87]. On näha, et helirõhk ei lange selle muusikalise fraasi jooksul alla 0,1 Pa; umbes 24% ajast ületab helirõhk 0,6 Pa. Vaid üks kord küünib rõhk väärtuseni 1,4 Pa. Määrates ka vahepealsete helirõhkude kestuse, saab konstrueerida graafiku, mis näitab helirõhu ajalist jaotust. Nimetatud muusikapala lõigu kohta on see toodud joonisel 1.7.

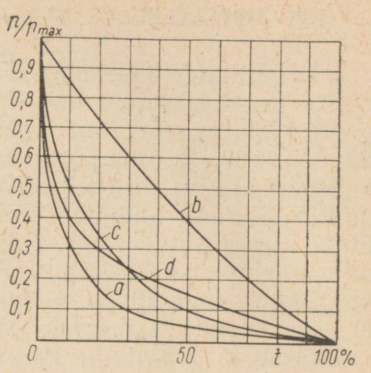
Joonisel 1.8 on toodud helirõhu suhteline ajaline jaotis Beethoveni 9. sümfoonia (kõver *a*), džässorkestri (kõver *b*), Beethoveni klaverivariatsioonide *C*-duur (kõver *c*) ja diktori kõne kohta (kõver *d*) [87].



Joon. 1.6. Muusikapala lõigu nivoo ostsillogramm ($\tau = 0{,}2$ s)



Joon. 1.7. Muusikapala lõigu nivoo statistiline jaotus



Joon. 1.8. Helirõhu suhteline jaotus:
a — sümfoonilises muusikas, *b* — tantsumuusikas, *c* — klaverimuusikas, *d* — diktori kõnes

Tehnilistes arvutustes kasutatakse nn. kvaasimaksimaalset väärtust. See on nivoo, mis ületatakse vaid 2% jooksul koguajast. Kvaasiminimaalne on nivoo, millest allapoole langeb helirõhk 2% jooksul koguajast.

Kvaasimaksimaalse helirõhu suhet kvaasiminimaalsesse väärtusesse nimetatakse *dünaamikapiirkonnaks D*, mida tavaliselt väljendatakse detsibellides. Mõnede heliallikate dünaamikapiirkond on toodud tabelis 1.1.

Tabel 1.1

Mõnede heliallikate dünaamikapiirkond

Heliallikas	*D*, dB
Diktori kõne	25...35
Deklamaatori esinemine	40...50
Väiksemad vokaal- ja instrumentaalansamblid	45...55
Sümfooniaorkester	Kuni 65

Kuna ringhäälinguülekandes on lubatavaks dünaamikapiirkonnaks 40 dB, toimub muusikasaate dünaamilise diapasooni ahendamine toonmeistri poolt *piano* tugevdamise ja *forte* nõrgendamisega. Seejuures tuleb arvestada esitatava pala dünaamikat ja *forte*, eriti aga *forte fortissimo* nõrgendamist alustatakse küllalt varakult, et varuda helitugevusele n.-ö. kasvuruumi ja jätta kuulajale helitugevuse pideva suurenemise mulje (vt. § 7.7; joon. 7.17).

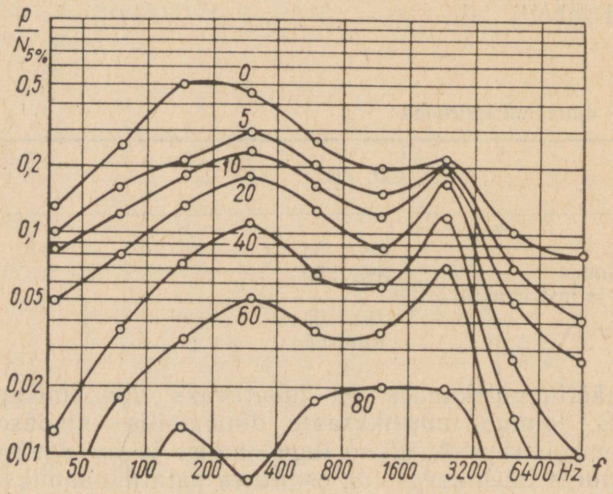
1.8. HELIALLIKATE STATISTILIS-DÜNAAMILISED SPEKTRID

Heliallikate täpsemaks iseloomustamiseks on lähemalt uuritud nende poolt tekitatud helirõhu spektraalset koostist. H. Luederi poolt 1930. a. teostatud mõõtmistel [32, 87] analüüsiti sagedusala 25 ... 12 800 Hz, mis jagati filtritega 9 ribasse. Igas ribas määrati helirõhu ajaline statistiline jaotus analoogiliselt joonisel 1.7 näidatule. Saadud andmete põhjal määrati maksimaalne nivoo, mis üldse esines antud ribas. Näiteks Puccini ooperi «Turandot» kohta on maksimaalse helirõhu sõltuvus sagedusest kujutatud joonisel 1.9 kõveraga «0%». Sellest suuremaid helirõhu väärtusi ooperis ei esine, nende esinemise tõenäosus on null. Analoogiliselt on määratud ja graafikule kantud helirõhud, millest suuremate väärtuste esinemise suhtelised ajad (tõenäosused) on vastavalt 5, 10, 20, 40, 60 ja 80%. Helirõhu ühikuks $N_{5\%} = 4{,}5$ Pa on siin võetud kõvera «5%» alune pind poollogaritmilises mastaabis:

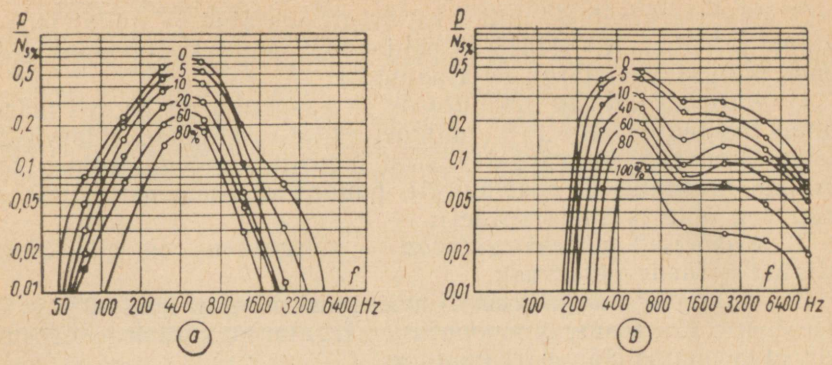
$$N_{5\%} = \int_{\ln 25}^{\ln 12\,800} p_{5\%}(f)\, \mathrm{d} \ln f = \int_{25}^{12\,800} \frac{p_{5\%}}{f}\, \mathrm{d}f. \qquad (1.12)$$

Näiteks maksimaalne helirõhk sagedusribas 100 ... 200 Hz on siin $0{,}5 \cdot 4{,}5 = 2{,}25$ Pa $= 22{,}5$ akbar. Olgu lisatud, et keskmine helirõhk ooperi kogu kestuse kohta oli $\overline{N} = 0{,}39$ Pa.

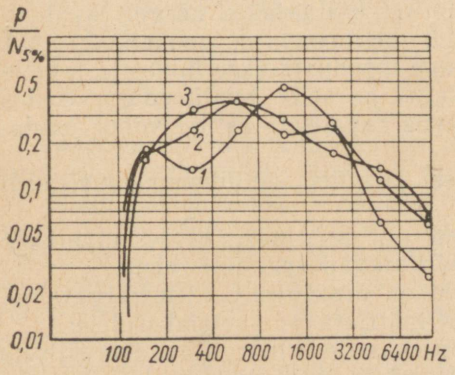
Klaverile iseloomulik statistilis-dünaamiline spekter on toodud joonisel 1.10.*a* (J. S. Bachi üks prelüüde, mikrofoni kaugus 1,5 m;



Joon. 1.9. Puccini ooperi «Turandot» statistilis-dünaamiline spekter ($N_{5\%} = 4{,}5$ N/m², $\overline{N} = 0{,}39$ N/m²)



Joon. 1.10. Klaveri (*a*) ja viiuli (*b*) statistilis-dünaamilised spektrid



Joon. 1.11. Diktorite kõne statistilis-dünaamilised spektrid: *1* — keskmise häälekõrgusega inglise diktor $N_{5\%}=0{,}965$ N/m², *2* — madala häälega vene diktor ($N_{5\%}=0{,}65$ N/m², *3* — keskmise häälekõrgusega itaalia diktor ($N_{5\%}=0{,}2$ N/m²)

$N_{5\%}=1{,}6$ Pa; $\overline{N}=0{,}18$ Pa) ja viiuli spekter joonisel 1.10.*b* (harjutus, mikrofoni kaugus 1 m, $N_{5\%}=1{,}65$ Pa; $\overline{N}=0{,}2$ Pa). Mitmesuguste diktorite hääle koostise kohta annavad ettekujutuse joonisel 1.11 toodud kõverad, mis vastavad nivoole, mille ületamise tõenäosus on 5%.

1.9. HELIÜLEKANDE LOOMUTRUUDUS JA SELLE MOONUTUSED

Ülekantud heli on seda loomutruum, mida täpsemalt selle heliväli sarnaneb originaalse heliväljaga heliallika juures. Mistahes erinevust originaalist nimetatakse moonutusteks.

Moonutuste mõju tajutavale heliaistingule selgitatakse n:n. *statistilis-subjektiivse ekspertiisiga.* Selleks antakse grupile ekspertidele kuulata vaheldumisi moonutamata ja moonutatud heli (juhuslikus järjestuses). Iga ekspert püüab oma subjektiivse mulje

järgi määrata kindlaks, millal esitati moonutatud ja millal moonutamata heli. ГОСТ 11515-65 põhjal [92] jaotatakse moonutused nende märgatavuse järgi nelja astmesse:

1) *mittemärgatavad moonutused* — eksperdid on õigesti märganud moonutusi alla 15% juhtudel esitatud kordade üldarvust; taoline kuni 15%-ne märgatavus on juhuslik viga, mis esineb ka siis, kui moonutused absoluutselt puuduvad (demonstreeritakse kogu aeg ühte ja sama seadet);

2) *praktiliselt mittemärgatavad* — märgatavus on alla 30% esitatud kordade üldarvust;

3) *ebaselgelt märgatavad* — moonutusi märgati kuni 50% juhtudest, s. t. tõenäosus, et moonutust märgatakse, võrdub tõenäosusele, et moonutus jääb märkamatuks;

4) *kindlalt märgatavad* — tajutakse enamikul juhtudel; tinglikult loetakse selleks märgatavust üle 50%.

Taoliste ekspertiiside läbiviimisel eraldatakse kõrgelt kvalifitseeritud eksperdid (toonmeistrid, heliinsenerid, muusikud jne.) omaette gruppi (I grupp). II grupp moodustatakse inimestest, kelle elukutse pole seotud helitehnikaga ja selle kvaliteediga. Selles grupis on moonutuste märgatavus tavaliselt astme võrra madalam.

Ekspertiisi põhjal eristatakse järgmisi heliülekandekvaliteedi klasse:

kõrgeim klass — moonutused on mittemärgatavad tavalisele kuulajale ja praktiliselt mittemärgatavad spetsialistidele;

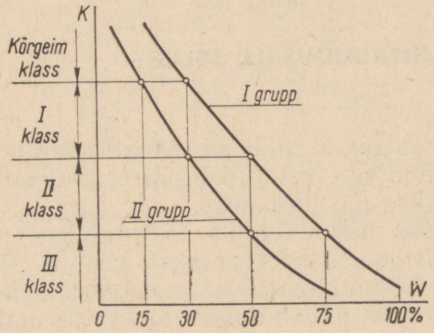
esimene klass — moonutused on praktiliselt mittemärgatavad tavalisele kuulajale ja ebaselgelt märgatavad spetsialistidele;

teine klass — moonutused on ebaselgelt märgatavad tavalisele kuulajale, kuid kindlalt märgatavad spetsialistidele;

kolmas klass — moonutused on kindlalt märgatavad tavalisele kuulajale.

Kvaliteediklassi K sõltuvust suhtelisest märgatavusest W on graafiliselt kujutatud joonisel 1.12.

Järgnevalt vaatleme lähemalt üksikuid moonutuste liike ja nende lubatavaid suurusi [78, 92].



Joon. 1.12. Kvaliteediklassi K sõltuvus suhtelisest märgatavusest W

Sagedusmoonutus. Seda tajutakse kõlavärvingu muutusena. Madalate sageduste piiramine põhjustab kõrgete sageduste ülekaalu ja annab helile lõikava metalse kõla. Kõrgete sageduste piiramisel muutub helitämber matiks. Kõrgete ja madalate sageduste üheaegne piiramine säilitab helikõla tasakaalu ja on vähem märgatav. Statistilis-subjektiivsete ekspertiiside põhjal kvaliteediklassidele kehtestatud normid on toodud tabelis 1.2.

Tabel 1.2

Elektroakustiliste seadmete sagedusalad sõltuvalt kvaliteediklassist

Kvaliteediklass	Kõrgeim	I	II	III
Sagedusala Hz ebaühtlusega ±3 dB	30 ... 15000	50 ... 10000	100 ... 6000	200 ... 4000

Faasimoonutus kujutab endast ülemtoonide ajalist nihet põhitooni e. I harmoonilise suhtes. Faasimoonutust põhjustavad filtrid või pikad ühendusliinid. Faasimoonutus on perioodiliste liitvõnkumiste juures vähemärgatav, sest kõrv oma ehituse tõttu on küll võimeline eraldama üksikuid harmoonilisi, kuid ei ole tundlik nende omavahelise faasi suhtes. Löökhelide puhul (millest muusika on nii rikas!) aga põhjustab kõrgema sagedusega (5 ... 8 kHz) komponentide hilinemus üle 5 ms tunduvaid moonutusi. Madalamate sagedustega komponentide hilinemine on vähem märgatav ja võib sagedusel 50 Hz ulatuda kuni väärtuseni 75 ms. Suurema hilinemuse puhul tuleb kasutada vastavaid faasikorrektoreid [87].

Mittelineaarmoonutus. Mittelineaarse trakti väljundis tekivad uued sageduskomponendid, mis puuduvad sisendsignaalis. See põhjustab heli kõla muutumise ebapuhtaks, karedaks, isegi kärisevaks. Trakti mittelineaarsust mõõdetakse siinuselise sisendpinge juures ja iseloomustatakse *mittelineaarmoonutusteguri* ehk *klirrteguriga*

$$k_{ml} = \frac{\sqrt{U_{II}^2 + U_{III}^2 + U_{IV}^2 + \dots}}{U_I} \cdot 100\%, \qquad (1.13)$$

kus U_I, U_{II}, U_{III}, U_{IV}, ... — väljundpinge harmoonilised komponendid.

Tegelikus olukorras on sisendsignaal statistilis-dünaamilise spektriga liitvõnkumine (vt. § 1.8), mistõttu väljundis tekib peale harmooniliste komponentide veel palju kõikvõimalikke kom-

Tabel 13

Lubatav klirrtegur k_{ml} % sõltuvalt sagedusest ja kvaliteediklassist

Sagedusriba Hz	Kvaliteediklass			
	Kõrgeim	I	II	III
30 ... 100	2/1	6/3	—	—
100 ... 200	1,5/0,7	3,5/1,7	8/4	—
200 ... 4000	1/0,6	2,5/1,2	4/2	7/3,6
4000 ... 7000	2/1	5/2,5	—	—

Märkus. Kaldjoone ees on toodud k_{ml} suurim lubatav väärtus seadme nimiväljundpingel U_n, kaldjoone järel väljundpingel $(0{,}1 \ldots 0{,}5)U_n$.

binatsioonsagedusi, mis ongi põhilised liitvõnkumiste kõla moonutajad. Võõrkomponentide hulk on ülal piiratud seadme ülemise piirsagedusega. Reaalses tööolukorras on väljundis tekkivate moonutuste hindamine osutunud kõige otstarbekamaks statistilis-subjektiivse ekspertiisiga. Selle põhjal kvaliteediklassidele kehtestatud k_{ml} normid protsentides on toodud tabelis 1.3.

Kaldjoone ees on toodud maksimaalselt lubatav väärtus nimiväljundpingel ja kaldjoone taga — piirkonnas 0,5 ... 0,1 nimiväljundpingest.

Mürad. Ülekandetraktis kasulikule signaalile liitunud mitmesugused kõrvalised signaalid ehk häired, nagu võrgumüra ehk võrgufoon, ühtlase spektriga ehk nn. valge müra, impulsshäired ja eri võimenduskanalite vaheline ülekostvus vähendavad heliülekande kvaliteeti.

Võrgumüra võimendi väljundis on sagedusega 50, 100 või 150 Hz ja mõõtmiseks eraldatakse see vastava filtriga või mõõdetakse mürapinge amplituudi ostsillograafi ekraanil.

Valge müra mõõtmiseks tuleb omakorda tõkestada vastava filtriga võrgumüra pääs mõõteaparatuuri. Soovitatav on kasutada ruutdetektoriga voltmeetrit (näit. B3-5 [13, 115]).

Ülekostvus on põhjustatud kanalitevahelistest parasiitsidestustest, mistõttu ühe kanali väljundis on segava häirena kuulda teise kanali signaal. Ülekostvust mõõdetakse kanali väljundis, kui teise kanalisse on antud mõõtegeneraatorist täisnivoo [28].

Impulsshäireid võivad põhjustada atmosfääris toimuvad elektrilahendused (äike) või ka tööstusseadmete kõikvõimalikud sädelevad kontaktid [111]. Neid häireid mõõdetakse impulssvoltmeetriga (näit. B4-3 [75, 116]).

Mürapinge U_M nivoo arvutatakse detsibellides nimiväljundpinge U_{vN} suhtes valemiga

$$N_M = 20 \lg (U_M/U_{vN}) \text{ dB}. \qquad (1.14)$$

Tabel 1.4

Mürapinge lubatav nivoo dB sõltuvalt kvaliteediklassist

Müra liik	Kvaliteediklass			
	Kõrgeim	I	II	III
Võrgumüra sagedusega 50, 100 ja 150 Hz	—60	—55	—50	—50
Ühtlase spektriga ehk valge müra	—62	—60	—55	—
Ülekostvus	—80	—74	—70	—70
Impulsshäired spektriga 1,5...3 kHz	—90	—85	—80	—
Impulsshäired spektriga alla 1,5 kHz	—60	—55	—50	—

Statistilis-subjektiivsete ekspertiiside põhjal kehtestatud maksimaalsed lubatavad mürapinge nivood on toodud tabelis 1.4.

Mürade mõõtmiseks on otstarbekas kasutada müramõõtureid [69, 121], mis oma akustiliselt kompenseeritud karakteristikuga arvestavad inimkõrva tundlikkuse vähenemist madalatel ja kõrgetel helisagedustel (vt. § 1.3.).

Moonutused helikandja kiiruse ebaühtlusest (detoneerimine). Mehaanilisest ebatäiuslikkusest tingituna pole magnetofonidel ega heliplaadiseadmetel helikandja (magnetofonilint, heliplaat) kiirus konstantne, vaid kõigub oma keskväärtuse ümber, mida nimetatakse detoneerimiseks. Detonatsioon põhjustab helikõrguse perioodilise muutumise, mistõttu puhtad toonid muutuvad tremoleerituks (vibreerivaks) või vidisevaks. Kõige häirivamat mõju avaldab taoline vibreerimine sagedusega 2...6 Hz. Detonatsiooni tajutavuse sõltuvus detonatsioonisagedusest on toodud tabelis 1.5 (OIRT[1] soovitus a. 1967. [114]).

Tabel 1.5

Detonatsiooni tajutavuse sõltuvus detonatsioonisagedusest

Detonatsiooni sagedus Hz	0,2	0,4	0,8	2,0	4,0	6,3	10	20	40	63	100	200 ja üle
Suhteline tajutavus	0,03	0,18	0,50	0,90	1,00	0,90	0,79	0,51	0,30	0,19	0,14	0,071

Maksimaalne lubatav *detonatsioon*, s. t. kiiruse maksimaalne kõrvalekalle keskväärtusest sõltub aparatuuri kvaliteediklassist ja on 0,04...0,5 % (taandatult sagedusele 4 Hz).

[1] OIRT — *Organisation Internationale de Radiodiffusion et Television* (Rahvusvaheline Ringhäälingu ja Televisiooni Organisatsioon).

Detonatsiooni mõõtmiseks on konstrueeritud vastavad mõõtseadmed, nn. detonomeetrid [120].

Mehaanilise ebatäiuslikkuse tõttu erineb magnetofonidel ja heliplaadiseadmetel ka keskmine kiirus nominaalsest, mis samuti põhjustab taasestatava heli moonutumise. Maksimaalselt lubatav keskmise kiiruse erinevus nimikiirusest sõltub samuti aparatuuri kvaliteediklassist ja on ± (0,5 . . . 3,5) % [125].

Stereofooniline heliülekanne. Erinevus kanalite helitugevustes ja nendevaheline ülekostvus ei tohi ületada tabelis 1.6 toodud väärtusi.

Tabel 1.6

Stereokanalitele esitatavad nõuded

Normitav parameeter	Kvaliteediklass			
	Kõrgeim	I	II	III
Helitugevuste erinevus, dB	0,5	1	2	3
Ülekostvus, dB	30	20	18	15

2.

Ruumiakustika

Käesolevas peatükis käsitletakse mõisteid ja põhimõtteid, mille tundmine on vajalik ruumide akustiliseks kujundamiseks.

Kõne ja muusika esitamisel ning ülekandmisel mõjuvad ruumi kõlalised e. akustilised omadused tunduvalt helikvaliteedile. Hea akustikaga peavad olema nii kontserdi- ja teatrisaalid kui ka raadio- ja televisioonistuudiod (viimased on teatavasti spetsiaalsed ruumid raadio- või televisioonisaadeteks ning proovideks). Ruum on helikanali (vt. 7. ptk.) esimeseks elemendiks. Siin tekkinud kõlalisi puudujääke on helikanali järgmistes lülides raske kõrvaldada.

Ruumi akustilised omadused olenevad peamiselt:

a) ruumi mahust ja proportsioonidest;

b) ruumi reverberatsiooniajast ja resonantsisagedustest;

c) heli summutavate materjalide omadustest, kogusest ja nende paigutusest ruumi pindadel (helivälja difuussusest);

d) ruumi heliisolatsioonist — võõrhelide stuudiosse tungimise tõkestamisest;

e) esinejate, kuulajate ja seadmete arvust stuudios;

f) helivõimenduse kasutamisest ruumis (saalivõimendus ja ambiofoonia, vt. 6. ptk.).

Ruumi, kus ei kasutata helivõimendust, nimetatakse *passiivse akustikaga ruumiks*. Ruumi, kus kasutatakse helivõimendust, nimetatakse *aktiivse akustikaga ruumiks*. Suuremad ruumid ja väljakud on harilikult aktiivse akustikaga [43].

Ruumiakustika põhimõtteid rakendatakse veel mürarikaste ruumide (lennujaamade ootesaalid, tehaste tsehhid, masinakirjabürood jne.) summutamisel heli neelavate materjalide ja konstruktsioonidega, kui ka väljakute müratasemе vähendamisel. Viimaseks

otstarbeks rajatakse väljakute äärde puiestikke või ümbritsetakse väljak otstarbekohaselt paigutatud hoonetega. Müratasеme alandamine ruumides ja väljakuil on väga vajalik tervishoiu seisukohalt.

Ruumi akustilistel arvutustel kasutatakse kas geomeetrilise või füüsikalise akustika põhimõtteid.

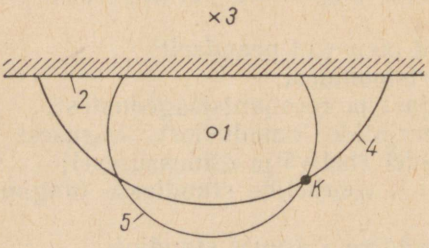
Geomeetrilises akustikas eeldatakse, et heli levib kiirtena nagu valgus. See on õige suurte ruumide puhul, kus ruumi mõõtmed on palju suuremad leviva heli lainepikkusest. Seepärast saab geomeetrilist akustikat edukalt kasutada suurte stuudiote, kino- ja kontserdisaalide arvutamisel.

Füüsikaline akustika kasutab põhiliste mõistetena ruumi reverberatsiooniaega ja resonantsisagedusi ning on kasutatav väikeste ruumide puhul, kus leviva helilaine pikkus on samas suurusjärgus ruumi mõõtmetega.

2.1. HELI LEVIMINE RUUMIS

Asugu punktikujuline heliallikas ruumis punktis *1* (joon. 2.1). Allikast levib kerapinnalise frondiga helilaine kõigis suundades. See laine peegeldugu seinalt *2*. Pärast peegeldumist moodustub lainefront *4*, mis näib olevat väljunud punktile *1* peegelsümmeetriliselt asuvast punktist *3*.

Asugu kuulaja ruumis punktis *K*. Temani jõuab nii otselaine frondiga *5* kui ka peegeldunud helilaine frondiga *4*. Kui peegeldunud heli saabub otsehelist üle 50 millisekundi hiljem, siis suudab kuulaja peegeldunud heli otsehelist eraldada.



Joon. 2.1. Heliallikate tekitatud otse- ja peegeldunud lainete kujutised

Sellist nähtust, kus peegeldunud helist on selgesti eraldatav otseheli, nimetatakse *kajaks*. Kui ajavahemik otse- ja peegeldunud heli saabumise vahel on väiksem kui 50 ms, siis kuulaja kaja ei taju, vaid otseheli kestus tundub pikemana.

Suletud ruumis, kus on palju peegeldavaid pindu (seinad, lagi ja põrand ning mitmesugused esemed), tuleb arvestada veel neilt peegeldunud lainetega. Kui lainete saabumise vahed on üle 50 ms, võib olla kuuldav paljukordne kaja. Kuid kui saabumise vahed on

alla 50 ms, siis kuulaja enam ei eralda laineid üksteisest, vaid tajub seda otseheli omapärase pikenemisega e. nn. *reverberatsioonina* [113].

Mingi materjali pinnale langeva otseheli energiatihedus E_1 (vt. joon. 2.9) on alati suurem kui pinnalt peegeldunud heli energiatihedus E_2, sest langevast helienergiast osa E_3 tungib materjalisse.

Helineeldumisteguriks α nimetatakse materjalisse sisenenud helienergia E_3 ja langeva helienergia E_1 suhet. Seega

$$\alpha = E_3/E_1. \tag{2.1}$$

Helipeegeldusteguriks β nimetatakse peegeldunud helienergia E_2 ja langeva helienergia E_1 suhet. Seega

$$\beta = \frac{E_2}{E_1}. \tag{2.2}$$

Ruumi sisepinnad (seinad, põrand, lagi, uksed, aknad) ja ruumis olevad esemed on sageli kaetud erinevaid helineeldumistegureid omavate materjalidega. Sel puhul kasutatakse ruumi keskmist helineeldumistegurit α_k, mis arvutatakse valemiga [113]

$$\alpha_k = \alpha_1 \frac{S_1}{S} + \alpha_2 \frac{S_2}{S} + \dots + \alpha_n \frac{S_n}{S} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^{n} \alpha_i S_i, \tag{2.3}$$

kus $\alpha_1, \alpha_2, \dots \alpha_n$ — materjalide neeldumistegurid; $S_1, S_2, \dots, S_n$ — erinevatest materjalidest pindade suurus; $S = \sum S_i$ — pindade kogupindala.

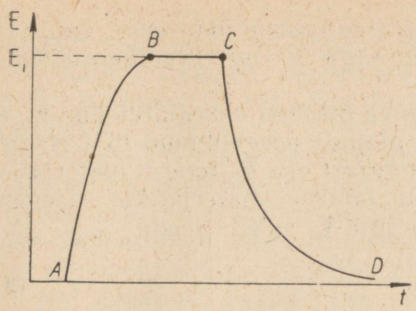
Kui ruumis paiknev heliallikas hakkab tööle, ei saavuta helienergia tihedus ruumis oma maksimaalväärtust kohe, vaid alles teatud aja möödumisel. Difuusse helivälja (vt. § 2.6) puhul toimub ruumis helienergia tiheduse suurenemine eksponentsiaalselt vastavalt valemile [113]

$$E = \frac{4P_a}{c_o \alpha_k S} \left(1 - e^{-\frac{c_o \alpha_k S t}{4V}}\right), \tag{2.4}$$

kus P_a — heliallika akustiline võimsus, V — ruumi maht, S — pindade kogupindala.

Helienergia tiheduse tõus ruumis on kujutatud joonisel 2.2 joonega AB. Helienergia tiheduse tõus ruumis lakkab, kui neelduv helivõimsus saab võrdseks juurdetuleva võimsusega. Joonisel 2.2 kujutab seda joonlõik BC. Helienergia tiheduse lõppväärtus E_l arvutatakse valemiga

$$E_l = \frac{4P_a}{c_o \alpha_k S}. \tag{2.5}$$



Joon. 2.2. Helitaseme tõus ja langus ruumis

Kui ruumis olev heliallikas välja lülitada, siis helienergia tihedus hakkab eksponentsiaalselt vähenema vastavalt valemile

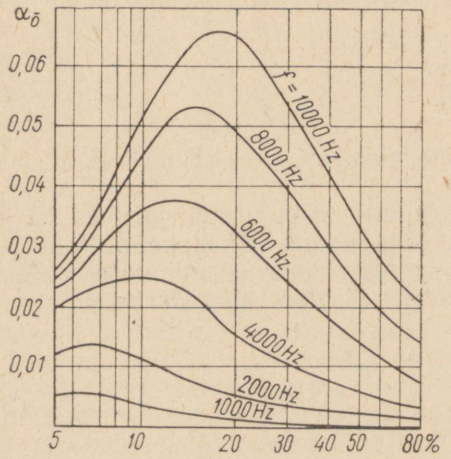
$$\mathbf{E} = \frac{4P_a}{c_0 \alpha_k S} e^{-\frac{c_0 \alpha_k S t}{4V}} = \mathbf{E}_l e^{-\frac{c_0 \alpha_k S t}{4V}} . \qquad (2.6)$$

Joonisel 2.2 kujutab seda joon *CD*.

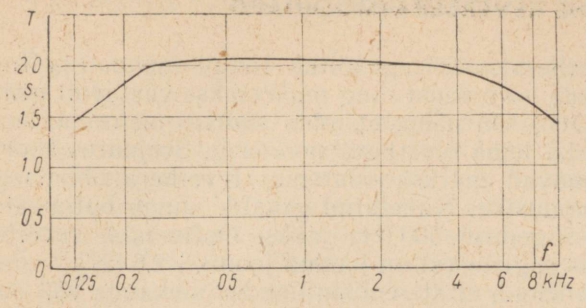
2.2. RUUMI REVERBERATSIOONIAEG

Pärast heliallika väljalülitamist hakkab helienergia tihedus ruumis eksponentsiaalselt vähenema. Aega, mille vältel helienergia ruumtihedus väheneb miljondikule oma väljakujunenud lõppväärtusest $\mathbf{E}_l$, nimetatakse *ruumi reverberatsiooniajaks T*. Võrdsustades valemis (2.6) $\mathbf{E} = 10^{-6}\mathbf{E}_l$, $t = T$, $c_0 = 340$ m/s, saadakse pärast matemaatilisi teisendamisi difuusse heliväljaga ruumi reverberatsiooniaja valemiks

$$T = \frac{0{,}164V}{-S \ln(1 - \alpha_k)} \text{ s}. \qquad (2.7)$$



Joon. 2.3. Õhu helineeldumisteguri $\alpha_õ$ (dB/m) sõltuvus suhtelisest niiskusest ja sagedusest



Joon. 2.4. Ruumi reverberatsiooniaja sõltuvus sagedusest

Valemis (2.7) on arvesse võetud ainult heli neelamist ruumi pindade ja ruumis leiduvate esemete poolt. Kuid heli sumbub ka õhus, eriti kõrgematel helisagedustel. Heli neelduvus õhus oleneb õhu temperatuurist ja suhtelisest niiskusest (joon. 2.3). Arvestades ka õhu helineeldumistegurit $\alpha_{\tilde{o}}$, on ruumi reverberatsiooniaja täpsemaks valemiks

$$T = \frac{0{,}164V}{4\alpha_{\tilde{o}}V - S\ln(1-\alpha_k)}\ \text{s}. \qquad (2.8)$$

On vaja lisada, et T väärtus sõltub heli sagedusest, sest α_k ja $\alpha_{\tilde{o}}$ väärtus sõltub sagedusest. Seepärast arvutatakse T väärtused real sagedustel piirkonnas 250 ... 8000 Hz ja esitatakse graafikuna (joon. 2.4) [44].

2.3. REVERBERATSIOONIAEG ÜHENDATUD RUUMIDES

Saalidel, millel on sügavad ja madalad rõdualused, või mis on avatud uste kaudu ühendatud teiste ruumidega, kestab reverberatsioon kauem ja moonutub. Taolised moonutused on väiksemad, kui rõdualuse ruumi sügavus ei ületa selle kahekordset kõrgust ja rõdualusel ruumil on sama reverberatsiooniaeg kui saalil [27].

Ruume võib sidestada ka elektroakustiliselt ja nimelt elektroakustilise helikanali (mikrofon — võimendi — valjuhääldi) kaudu. Näiteks sidestatakse selliselt kontserdisaali režiiruum kontserdisaaliga. Elektroakustiliselt sidestatud ruumi resulteeriv reverberatsiooniaeg T_3 leitakse valemiga [113]

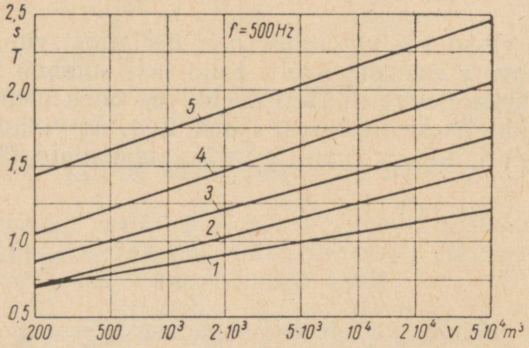
$$T_3^3 = T_1^3 + T_2^3, \qquad (2.9)$$

kus T_1 ja T_2 on vastavate ruumide reverberatsiooniajad ilma sidestuseta.

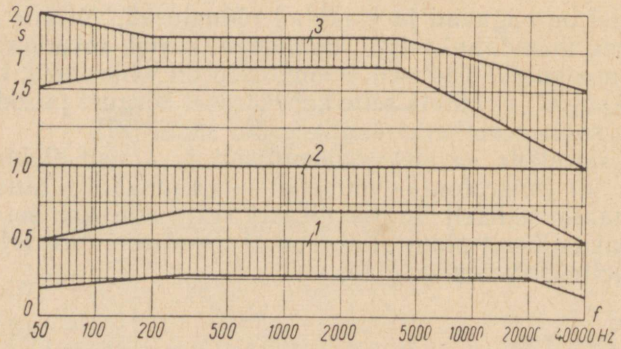
2.4. OPTIMAALNE REVERBERATSIOONIAEG

Optimaalne reverberatsiooniaeg sõltub ruumi mahust ja ruumis toimuva ettekande iseloomust ning määratakse vastavalt graafikult (joonis 2.5) [106]. On näha, et mida suurem on ruum, seda suurem peab olema ka tema reverberatsiooniaeg. Seejuures koorid ja orelimuusika nõuavad märksa suuremat reverberatsiooniaega kui kõne või tantsumuusika. Nimetatud graafik annab optimaalse reverberatsiooniaja sageduse 500 Hz jaoks. Optimaalse reverberatsiooniaja sõltuvus sagedusest on toodud joonisel 2.6 [27].

Praktikas on ilmnenud, et stereofoonilise heliülekande või -salvestuse puhul on optimaalne reverberatsiooniaeg veidi väiksem joonistel 2.5 ja 2.6 näidatuist.



Joon. 2.5. Ruumi optimaalse reverberatsiooniaja T sõltuvus ruumi mahust V (f=500 Hz):
1 — helifilm, *2* — kõne, *3* — kerge muusika, *4* — sümfoonia, *5* — koori- ning orelimuusika



Joon. 2.6. Ruumi optimaalse reverberatsiooniaja sõltuvus sagedusest:
1 — kõnesaalid, *2* — üldkasutatavad saalid, *3* — suured saalid

2.5. RUUMI RESONANTSISAGEDUSED

Resonantsinähtused ruumis avaldavad ruumi akustikale tunduvat mõju.

Resonantsinähtuste seisukohast võib akustilist ruumi võrrelda mõlemast otsast suletud toruga (orelivilega), milles õhk peale põhitooni ehk esimese harmoonilise f_1 võib võnkuda veel tervel real ülemtoonidel ehk kõrgematel harmoonilistel sagedustel $f_2 \ldots f_n$.

Torus tekivad seisvad lained, kusjuures otspindadel peab õhuosakeste võnkekiirus võrduma nulliga. Viimane on võimalik vaid siis, kui toru pikkusesse l mahub täisarv poollaineid $\lambda/2$. Seega

$$\frac{2l}{\lambda} = n, \quad \text{millest} \quad \lambda = \frac{2l}{n},$$

kus $n = 1, 2, \ldots$ — positiivne täisarv.

Nüüd on määratav toru n.-s resonantsisagedus

$$f_n = \frac{c}{\lambda} = \frac{nc}{2l}. \tag{2.10}$$

Analoogiline on olukord pika ja kitsa ruumi puhul, kus helilaine võib levida põhiliselt vaid pikisuunas. Avaras ristkülikulises ruumis võib helilaine levida meelevaldses suunas, kuid seisvad lained ja ruumi omaresonants tekib vaid siis, kui ruumi pikkusesse L, laiusesse W ja kõrgusesse H mahub täisarv poollainepikkusi. Viimasest tingimusest saadaksegi nn. Rayleigh' valem ruumi resonantsisageduste arvutamiseks:

$$f_{n,m,s} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{n}{L}\right)^2 + \left(\frac{m}{W}\right)^2 + \left(\frac{s}{H}\right)^2}\ \text{Hz}, \tag{2.11}$$

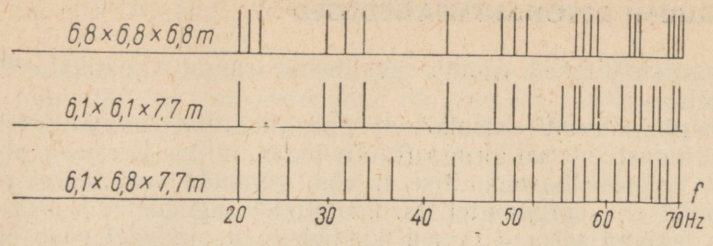
kus n, m, s — vabalt valitud positiivsed täisarvud.

Ruumi resonantsisageduste arv n_0, arvates põhisagedusest f_1 kuni sageduseni f_n, leitakse valemiga

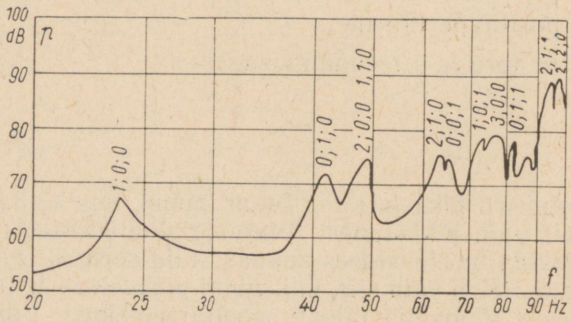
$$n_0 = \frac{4Vf_n^3}{c^3}.$$

See valem on kehtiv, kui f_n on suurem kui $4c/\sqrt[3]{V}$.

Kui muuta ruumi kuju nii, et ruumi maht seejuures ei muutu, siis resonantsisageduste arv jääb endiseks, kuid resonantsisageduste asetus võib muutuda. Jooniselt 2.7 on näha, et ruumi resonantsisagedused ei ole jaotatud ühtlaselt. Näiteks kuubikujulises ruumis mõõtmetega 6,8×6,8×6,8 m on mõnes sageduspiirkonnas resonantsisagedused koondunud gruppideks. Ruumis, mille



Joon. 2.7. Erinevate mõõtmetega ruumide resonantsisageduste karakteristikud



Joon. 2.8. Ruumi resonantsisageduste karakteristik (resonantsisageduste kohale kirjutatud arvud on resonantsiarvud *n*, *m*, *s*)

resonantsisagedused on koondunud gruppideks, on heli resonantsisagedustel «võimendatud». Näiteks on oreli heli sellises ruumis resonantsisagedustel palju tugevam kui teistel sagedustel. Seega ruum moonutab ettekannet. Kui aga ruumi resonantsisagedused on jaotatud ühtlaselt, näiteks ruumis 6,1×6,8×7,7 m (joon. 2.7), siis küllalt suure arvu resonantsisageduste puhul ei suuda kõrv eraldada enam «võimendatud» heli tavalisest helist. Seega hea akustikaga ruumi tingimuseks on, et tema resonantsisagedused oleksid jaotatud kuuldesagedusalas ühtlaselt.

Resonantsisageduste eksperimentaalseks määramiseks asetatakse ruumis mõõtemikrofon heliallikast (valjuhääldist) küllalt kaugele ja hoitakse heliallika signaalitase konstantne, kuid muudetakse heliallika helisagedust. Saadud helirõhu sõltuvus sagedusest ruumis mõõtmetega 13×4,1×2,56 m on toodud joonisel 2.8. Resonantsisageduste kohale kirjutatud arvud on tegurid *n*, *m* ja *s*. Sellist sageduskarakteristikut nimetatakse ruumi *resonantsisageduste karakteristikuks* [27].

2.6. HELI DIFUUSSES RUUMIS

Ruumi reverberatsiooniaja arvutamisel eeldatakse, et ruumis asuvasse mikrofoni jõuab ruumi pindadelt kõikvõimalikest suundadest võrdse energiatihedusega peegeldunud heli. Niisugust ruumi nimetatakse *suunaliselt difuusseks ruumiks*. Harilikult ei ole ruum täielikult difuusne ja seda polegi vaja, sest siis ei suudaks kuulaja kindlaks määrata heliallika asukohta.

Difuussus madalal ja keskmisel helisagedusel oleneb ruumi pindade ebakorrapärasusest, summutusmaterjalide ja esemete paigutusest ruumis, samuti ka ruumi lae ja põranda ning seinte mitteparalleelsusest.

Kui esemete või ruumi seinte ebakorrapärasus on lähedane neile langeva helilaine pikkusega või sellest suurem, siis see suurendab difuussust ruumis. Kui aga helilaine on pikk, võrreldes ruumis asuvate esemete või seinte ebakorrapäraste mõõtmetega, siis see ei suurenda difuussust.

2.7. RUUMI OPTIMAALNE MAHT

Ruumi optimaalne maht sõltub esinejate arvust N. Mida suurem on esinejate arv, seda suurem peab olema ruumi maht.

Kuni 2000-m³ ruumi mahu arvutamisel soovitatakse kasutada järgmist valemit [105]

$$V = 21n + 55 \text{ m}^3, \tag{2.12}$$

kus n — tegur, mis sõltub esinejate arvust N ning orkestri liigist. Näiteks puhkpilliorkestri esinemisel $n = N/0{,}2$, sümfooniaorkestri korral $n = N/0{,}25$ ja rahvamuusikaorkestri korral $n = N/0{,}5$.

Suuremate (üle 2000 m³) ruumide arvutamiseks kasutatakse järgmist valemit:

$$n = 0{,}125V^{2/3} \lg V. \tag{2.13}$$

Harilikult arvestatakse raadiostuudiotes orkestri iga liikme kohta põrandapinda 3 m² ja iga kooriliikme kohta 1,5 m² [78].

Nagu varem selgus, sõltuvad ruumi resonantsisagedused ruumi mõõtmetest (vt. joon. 2.7). Häid akustilisi tulemusi ruumide ehitamisel on saadud, kui ruumi mõõtmed vastavad nn. kuldlõike valemile, kus ruumi pikkus L, laius W ja kõrgus H on omavahel seotud järgmiselt:

$$L:W = W:H; \quad L = W + H.$$

Et ruumi maht $V = LWH$, siis «kuldlõikelisel» ruumil

$$H = 0{,}62\sqrt[3]{V}, \quad W = \sqrt[3]{V} \quad \text{ja} \quad L = 1{,}62\sqrt[3]{V}. \tag{2.14}$$

Väikeste stuudiote ehitamisel peab silmas pidama, et ruumi kõrgus oleks vähemalt 3 m.

2.8. HELINEELDEMATERJALID

Akustiliste ruumide sisepinnad kaetakse heli neelavate materjalidega. Need materjalid peavad: 1) sobima antud ruumi sisekujundusega, 2) olema kergesti puhastatavad, 3) omama küllaldast mehaanilist tugevust, 4) vastama tuleohutuse eeskirjadele, 5) olema odavad.

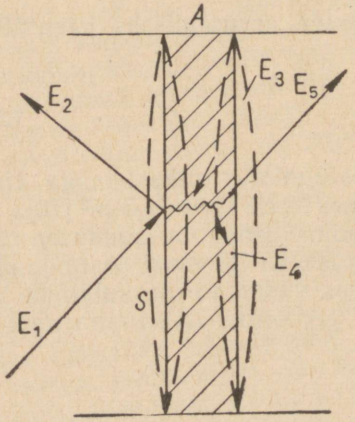
Füüsikaliste omaduste poolest jagunevad helineeldematerjalid poorseteks ja resoneerivateks.

Viimasel ajal on kasutust leidnud ka elektroonsed helineeldeseadmed [42].

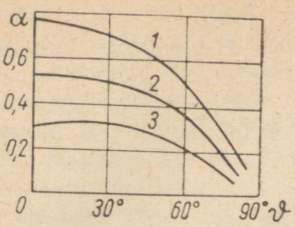
Helienergia sumbumist erinevais materjalides hinnatakse helineeldumisteguri abil (vt. lisa 3).

Neeldumistegur α sõltub peamiselt sagedusest ja materjalile langeva helilaine langemisnurgast.

Helineeldumisnähtuste selgitamisel eeldatakse, et kui helilaine energiatihedusega E_1 langeb seinapinnale S (joon. 2.9), siis osa helienergiast (E_2) peegeldub ruumi tagasi, osa (E_3) aga tungib materjali sisse. Sissetunginud energiast osa (E_4) neeldub seina materjalis, kuna osa (E_5) läbib seina. Kui sein on küllalt õhuke, siis võib ta membraanina võnkudes (joonisel näidatud kriipsjoonega) põhjustada helienergia kandumise ühest ruumist teise. Kui seinamaterjalis leidub õõsi, siis võngub õõne õhumass nagu Helmholzi resonaator.



Joon. 2.9. Heli peegeldumine ja tungimine läbi seina:
E_1 — langev helienergia, E_2 — peegelduv energia, E_3 — sissetungiv energia, E_4 — neelduv energia, E_5 — läbiv energia



Joon 2.10. Neeldumisteguri α sõltuvus helilaine langemisnurgast ϑ ja materjali akustilisest takistusest

Poorsed helineeldematerjalid. Harilikult suureneb materjali helineeldumistegur α materjali poorsuse suurenemisega. Poorse materjali neeldumistegur on seda suurem, mida rohkem materjali akustiline takistus $r_a = c\varrho$ läheneb õhu akustilisele takistusele [113]. Samuti on selgunud, et neeldumistegur on seda väiksem, mida suurem on helienergia langemisnurk, s. o. nurk helilaine suuna ja materjali pinna normaali vahel. Seda kinnitab ka joonis 2.10, kus kõver *1* vastab materjalile, mille akustiline takistus võrdub õhu kahekordse akustilise takistusega ($r_a = 2\,c\varrho$), kõver *2* materjalile, millel $r_a = 5\,c\varrho$ ja kõver *3* materjalile, millel $r_a = 10\,c\varrho$.

Poorsete akustiliste materjalide neeldumistegur sõltub helisagedusest, samuti ka materjali paksusest ja kinnitusviisist seinale. Eriti mõjutab neeldumisteguri väärtust helineeldematerjali ja aluse (seina) vaheline õhuvahe. Näiteks mineraalvati ПП-80 neeldumistegurid sõltuvalt materjali paksusest ja seinale kinnituse viisist on toodud tabelis 2.1. Teiste Nõukogude Liidus toodetavate tüüpsete helineeldematerjalide kohta võib andmeid leida vastavaist käsiraamatuist [113].

Ruumi akustilisel kujundamisel kasutatakse rohkesti poorseid helineeldematerjale, kuid seejuures jäetakse sageli arvestamata, et nende helineeldumistegur α väheneb madalatel helisagedustel (vt. tabel 2.1).

Tabel 2.1

Mineraalvati ПП-80 helineeldumistegurid

Materjali kihi paksus mm	Kinnitus õhuvahega (mm) või ilma	Helineeldumistegur sagedusel Hz						
		125	250	500	1000	2000	4000	6000
25	—	0,08	0,3	0,64	0,89	0,95	0,81	0,73
2×25	—	0,18	0,60	0,98	0,95	0,94	0,82	0,73
50	—	0,14	0,52	0,90	0,99	0,92	0,82	0,78
50	50	0,20	0,61	0,98	0,94	0,92	0,78	0,76
50	100	0,38	0,80	0,94	0,88	0,86	0,79	0,77
100	—	0,50	0,92	0,98	0,98	0,91	0,80	0,75
2×50	100	0,62	0,97	0,98	0,97	0,94	0,81	0,76

Tabel 2.2

Joonisel 2.13 kujutatud konstruktsiooni helineeldumistegurid

Kinnitustingimus		Helineeldumistegur sagedusel Hz												
Materjalikihi paksus mm	õhuvahe mm	100	125	160	200	250	300	400	500	800	1000	2000	4000	6000
50	—	0,26	0,37	0,64	0,82	0,68	0,53	0,39	0,31	0,19	0,15	0,10	0,09	0,08
50	50	0,34	0,40	0,69	0,85	0,70	0,58	0,42	0,30	0,17	0,12	0,10	0,05	0,05
100	—	0,50	0,77	0,74	0,70	0,64	0,49	0,36	0,30	0,18	0,15	0,15	0,10	0,09
100	100	0,70	0,80	0.72	0,64	0,52	0,45	0,33	0,27	0,16	0,14	0,12	0,10	0,10

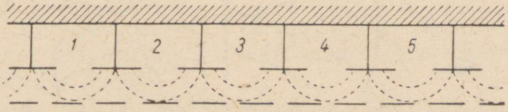
Seega kui kasutada ruumis ainult poorseid helineeldematerjale, siis saadakse ruumis madala tämbriga ilma särata heli. Niisuguse ruumi reverberatsiooniaeg madalatel helisagedustel on pikem kui kõrgematel helisagedustel. Sama reverberatsiooniaeg nii kõrgetel kui ka madalatel helisagedustel saadakse siis, kui ruumis kasutatakse peale poorsete materjalide veel resoneerivaid heli neelavaid konstruktsioone, mis summutavad madalaid helisagedusi.

Resoneerivad helineeldematerjalid. Kui perforeeritud vineer- või kipsplaat seinast veidi eemale paigutada ja plaadis leiduvate avade taga olev ruum vaheseinastada, siis kujutab selline konstruktsioon endast Helmholtzi resonaatorite komplekti (joon. 2.11). Kasutatakse ka mitmekordseid resonaatoreid, mis põhjustavad heli neeldumise palju laiemas sagedusribas (joon. 2.12).

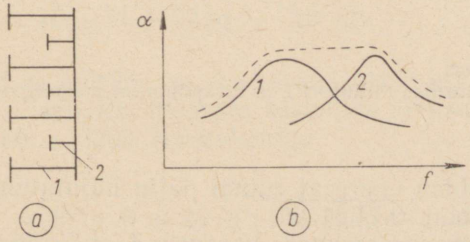
Absorbeeriva täitematerjaliga ja õhuvahega (joon. 2.13) perforeeritud vineerplaadil on madalatel helisagedustel suur helineeldumistegur. Vineerplaat on 4...6 mm paksune, millel on 100-mm vahedega augud läbimõõduga 5 mm. Konstruktsiooni neeldumistegur mitmesugustel sagedustel on toodud tabelis 2.2.

Kuna sellised konstruktsioonid summutavad tugevalt madalaid helisagedusi, siis on nad edukalt kasutatavad kõnestuudiote ehitamisel.

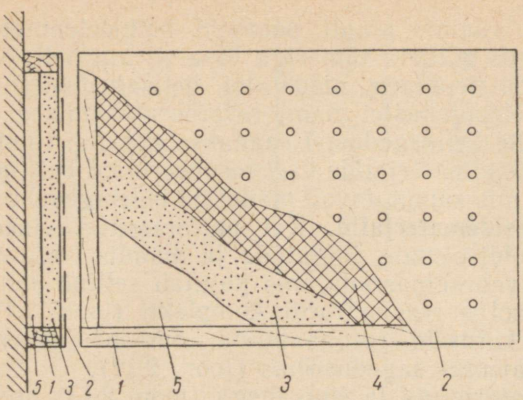
Akustilised plaadid võivad olla mitmesuguse kujuga. Sobivaks kujuks on osa ringsilindri pinnast (joon. 2.14.*a*). Selline plaat toimib nii heli summutajana kui ka hajutajana ehk difuusorina [50].



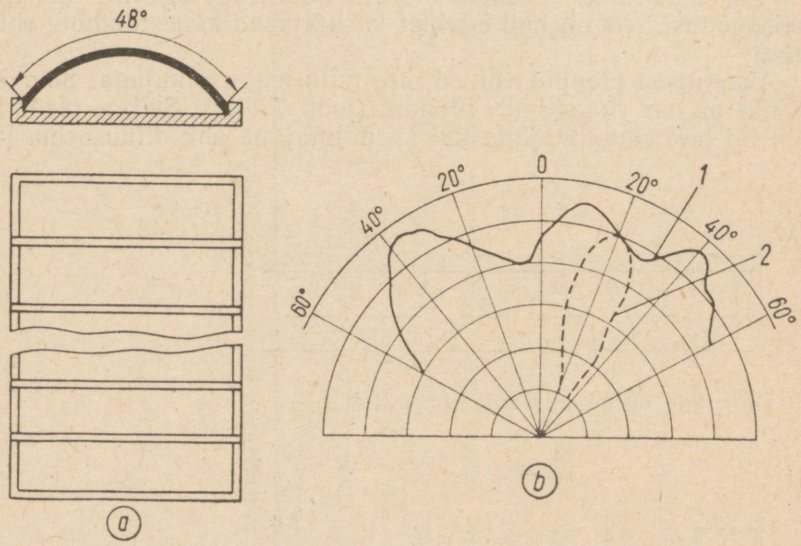
Joon. 2.11. Heliresonaatorite komplekt (1...5)



Joon. 2.12. Kahekordse resonaatori skeem (*a*) ja resonantsisageduste karakteristikud (*b*)



Joon. 2.13. Täitematerjaliga akustiline plaat:
1 — puitraam, *2* — perforeeritud vineerplaat, *3* — poorne materjal (mineraalvatt), *4* — katteriie, *5* — õhuvahe



Joon. 2.14. Silindriline difuusor:
a — vaade ja lõige, *b* — silindrilise difuusori *1* ja tasapinnalise helipeegeldaja *2* helipeegeldusköverad

Silindriline difuusor peegeldab energiat ruumi palju hajutatumalt kui tasapinnaline plaat (joon. 2.14.*b*).

Elektroonilised helisummutusseadmed koosnevad mikrofonist, võimendist ja valjuhääldist. Valjuhääldi töötab langeva helilainega vastandfaasis ja seega summutab heli [42].

2.9. RUUMI HELIISOLATSIOON

Heli kvaliteetseks ülekandeks või salvestuseks on vajalik, et ruumi, kus toimuvad kõne- või muusikaettekanded, ei tungiks välismüra.

Ruumi helikindluse e. heliisolatsiooni all mõeldakse tema kaitstust välismürade sissetungimise eest. Ruumi heliisolatsioon sõltub ruumi piirete (seinad, lagi ja põrand), uste ning akende konstruktsioonist ning ka ruumi kütte- ja ventilatsioonisüsteemist.

Mingi piirde helikindluseks ζ nimetatakse piirdele langeva helienergia E_1 (vt. joon. 2.9) ja piiret läbinud helienergia E_5 suhet.

$$\zeta = \frac{E_1}{E_5}. \tag{2.15}$$

Piirde heliisolatsiooniks σ nimetatakse piirdele langeva ja piiret läbinud helienergiate suhet detsibellides:

$$\sigma = 10 \lg (E_1/E_5) = 10 \lg \zeta \text{ dB}. \tag{2.16}$$

Korrutades eelmises valemis lugejat ja nimetajat standardse nullnivooga E_0, saadakse:

$$\sigma = 10 \lg \frac{E_1}{E_0} \cdot \frac{E_0}{E_5} = 10 \lg \frac{E_1}{E_0} - 10 \lg \frac{E_5}{E_0} = N_1 - N_5 \text{ dB},$$

kus N_1 on piirdele langeva heli nivoo ja N_5 — helinivoo teisel pool piiret. Seega piirde heliisolatsioon võrdub heli nõrgenemisele piirdes detsibellides.

Ruumi piirete heliisolatsioon. Heliisolatsioon sõltub peamiselt sellest, kas piire on suhteliselt õhuke, nii et võngub temale langeva helilaine mõjul kui plaat, või on küllalt paks ja jäik, nii et ta helilainete mõjul ei paindu, vaid võngub kui jäik kolb.

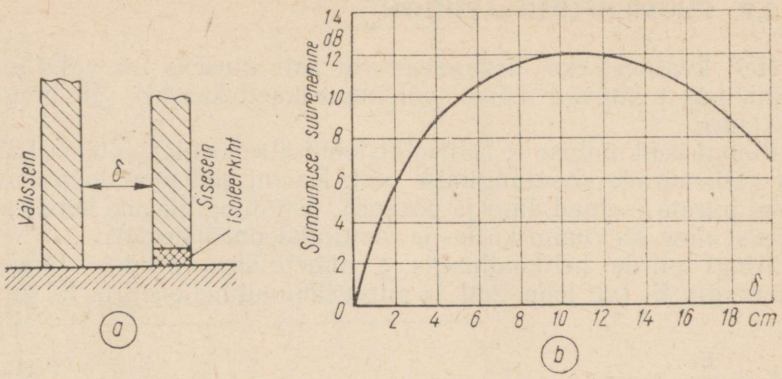
Jäiga piirde heliisolatsioon arvutatakse valemiga [113]

$$\sigma = 20 \lg M + 20 \lg f - 43 \text{ dB}, \tag{2.17}$$

kus M — piirde ühe ruutmeetri mass kg. Heliisolatsiooni arvutamisel piisab, kui määrata keskmine heliisolatsioon sagedusvahemikus 100 ... 3200 Hz valemiga

$$\sigma_k = 20 \lg M + 20 \lg \sqrt{100 \cdot 3200} - 43 = 20 \lg M + 12{,}3 \text{ dB}.$$

Mõõtmisel on aga näidatud, et paksudki seinad paindu-vad teatud määral läbi, mistõttu praktikas arvutatakse jäi-



Joon. 2.15. Kahekordse seina konstruktsioon (*a*) ja heli sumbumuse suurenemise sõltuvus õhuvahe laiusest (*b*)

kade piirete keskmine heliisolatsioon järgmiste empiiriliste valemitega

$$\sigma_k = 13{,}5 \lg M + 13, \text{ kui piirde mass } M \leqslant 200 \text{ kg/m}^2, \quad (2.18)$$

$$\sigma_k = 23 \lg M - 9, \text{ kui piirde mass } M > 200 \text{ kg/m}^2. \quad (2.19)$$

Mitmesuguste piirete σ_k on toodud lisas 4.

Suhteliselt õhukese ja plaadina võnkuva piirde heliisolatsioon väheneb tunduvalt piirde kui plaadi resonantsisagedustel (valem 3.24). Õhukese seina heliisolatsiooni saab tunduvalt suurendada, kui suurendada seina jäikust ristsihis asuvate ribide abil.

Ruumi heliisolatsiooni saab märgatavalt parandada kihiliste piirete kasutamisega. Tavaliselt kasutatakse kahekordset seina õhuvahega (joon. 2.15.*a*). Seetõttu suureneb seina heliisolatsioon $\Delta\sigma$ võrra, mille sõltuvus õhuvahe laiusest δ on toodud joonisel 2.15.*b*. Õhuvahe optimaalseks laiuseks osutub 8 ... 12 cm, mispuhul heliisolatsioon suureneb ca 12 dB võrra. Kui õhuvahe täita mingi poorse helineelava materjaliga, näit. mineraalvatiga, suureneb heliisolatsioon veelgi. Sisesein tuleb betoonvahelaest isoleerida vetruva vahekihiga (joon. 2.15.*a*). See võib olla kas asbestist, fiiberpapist või bituumeniga immutatud vildist.

Avade heliisolatsioon. Katsed näitavad, et piirdes olevad väikesedki avad ja pilud vähendavad tunduvalt piirde heliisolatsiooni. Seejuures kõrgematel helisagedustel on heliisolatsioon halvem kui madalatel sagedustel. Näiteks 15 cm paksuses seinas olev ava läbimõõduga 2 cm vähendab heliisolatsiooni sagedusel 0,5 kHz 3 dB võrra, sagedusel 2 kHz aga 12 dB võrra [106].

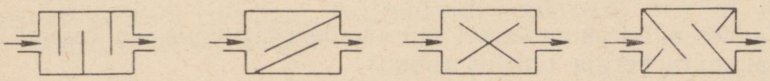
Helikindlad uksed ja aknad. Tihedalt suletud tavalise ühekordse ukse heliisolatsioon on 17 ... 20 dB ja kahekordsel uksel 26 ... ... 30 dB. Uste tunduvalt väiksem heliisolatsioon võrreldes sein-

tega on tingitud uste väiksemast massist pinnaühiku kohta M (kg/m^2).

Ukse heliisolatsiooni suurendamiseks valmistatakse ta kihilisena ja valtsides kasutatakse poorkummist tihendeid. Näiteks punnitud laudadest neljakihilisel uksel paksusega ca 85 mm on heliisolatsioon 35 dB [118]. Seintega samaväärse heliisolatsiooni saamiseks tuleb kasutada kaht taolist ust, jätta nende vahele ca 1 m pikkune väike esik ja vooderdada see helineeldematerjaliga.

Heliülekande- või salvestusruumi ja foonika vahelise akna kõrgus on tavaliselt 0,9 m, laius 1,2 ... 2 m. Küllaldase heliisolatsiooni (50 ... 55 dB) saamiseks kasutatakse kolmekordsete klaasidega akent. Optimaalseks klaasi paksuseks on 6 ... 7 mm ja klaaside vahekauguseks 20 cm. Raamide sisepind kaetakse kas vildi või mõne muu helineeldematerjaliga. Klaasi ja raamivaltsi vahel peab olema poorkummist tihend [106].

Mürade tungimine ruumi kütte- ja ventilatsioonisüsteemi kaudu. Et vähendada müra tungimist ruumi küttesüsteemi kaudu, tuleb keskküttetorud ja -radiaatorid seinale kinnitada elastsete (vildist, asbestist või kummist) vahetükkide abil. Seinast läbiminevatele torudele tuleb peale tõmmata elastne toru. Kahekordse piirde läbimisel tuleb kasutada elastset vahemuhvi. Torude arv ja nende pikkus ruumis peab olema minimaalne.



Joon. 2.16. Akustiliste filtrite skeeme

Ventilatsioonisüsteemis põhjustavad mürasid nii ventilaatorite elektrimootorid kui ka tiivikud. Mootorite müra võib kanduda ruumi kas läbi mootori vundamendi ja seinte nn. vibratsioon- e. kontaktmürana või õhu teel läbi ventilatsioonikanali. Vibratsioonimüradest vabanemiseks tuleb ventilaator paigutada omaette vundamendile (alusele) ja isoleerida see muust hoonest kummist või korgist plaadiga. Et tõkestada müra levimist läbi ventilatsioonikanali, peab viimane olema küllalt pikk, sujuvate käänakutega ning seest vooderdatud helineeldematerjaliga. See tagab kanalis leviva helilaine mitmekordse põrkumise vastu kanali seinu ja sumbumise. Vajaduse korral tuleb ventilatsioonikanalis kasutada nn. akustilisi filtreid. Need on kanalist suurema ristlõikega nelinurksed kambrid, millesse on paigutatud helineeldematerjaliga kaetud ribid või vaheseinad (joonis 2.16).

2.10. RUUMI MÜRANIVOO ARVUTAMINE

Heliülekandeks või -salvestuseks kasutatava ruumi müranivoo ei tohi ületada 25 ... 30 dB. Teades ruumi piirete ja uste-akende heliisolatsiooni ja müranivood väljaspool ruumi, on väljast sissetungivate mürade energia ja tekkiv müranivoo ruumis arvutatav järgmiselt. Olgu müranivoo väljaspool piiret N. Siis valemi 1.10 põhjal on müra energiatihedus väljaspool piiret $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cdot 10^{0{,}1N}$. Statistilise füüsika põhjal on difuusse helivälja puhul piirdele langeva heli intensiivsus $\mathbf{I} = \mathbf{E}c_0/4$. Kui piirde pindala on S ja helikindlus ζ, siis piiret läbinud müra võimsus

$$P = \frac{\mathbf{I}S}{\zeta} = \frac{\mathbf{E}c_0 S}{4\zeta} = \frac{\mathbf{E}_0 \cdot 10^{0{,}1N} c_0 S}{4\zeta}.$$

Valemi 2.16 põhjal $\zeta = 10^{0{,}1\sigma}$. Seega

$$P_\Sigma = \frac{c_0 \mathbf{E}_0}{4} \sum_{i=1}^{n} S\, 10^{0{,}1(N_i - \sigma_i)}. \qquad (2.20)$$

Ruumi tunginud müra koguvõimsus on läbi kõikide piirete ja uste-akende tunginud võimsuste summa:

$$P_\Sigma = \frac{c_0 \mathbf{E}_0}{4} \sum_{i=1}^{n} S_i \cdot 10^{0{,}1(N_i - \sigma_i)}. \qquad (2.21)$$

Teades nüüd summaarset müravõimsust ruumis, on valemi 2.5 põhjal müraenergia tihedus ruumis

$$\mathbf{E}_M = \frac{4P_\Sigma}{c_0 \alpha_k S} = \frac{\mathbf{E}_0}{\alpha_k S} \sum_{i=1}^{n} S_i \cdot 10^{0{,}1(N_i - \sigma_i)}.$$

Sellele vastab müranivoo ruumis

$$N_M = 10 \lg \frac{\mathbf{E}_M}{\mathbf{E}_0} = 10 \lg \sum_{i=1}^{n} S_i \cdot 10^{0{,}1(N_i - \sigma_i)} - 10 \lg \alpha_k S. \qquad (2.22)$$

Valemist nähtub, et müranivoo vähendamiseks ruumis tuleb vähendada müranivood väljaspool ruumi ja suurendada ruumi heliisolatsiooni ning keskmist helineeldumistegurit α_k. Viimase suurendamine kahekordseks vähendab ruumi müranivood 3 dB võrra.

3.

Elektroakustika

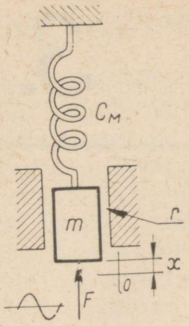
Elektroakustika uurib elektromehaaniliste muundurite teooriat ja arvutusmetoodikat.

Elektromehaanilise muunduri ülesandeks on muundada elektrilisi signaale mehaanilisteks ja vastupidi. Seega on taoline muundur elektroakustiliste seadiste (valjuhääldi, mikrofon, telefon jms.) üks olulisemaid koostisosi.

3.1. AKUSTILISTE JA ELEKTRILISTE SUURUSTE VÕRDLUS

Mehaanilise süsteemi elektriline aseskeem. Elektroakustilise seadise (mikrofon, valjuhääldi jne.) akustilises ja mehaanilises osas toimuvate protsesside matemaatiliseks kirjeldamiseks kasutatakse akustika ja teoreetilise mehaanika diferentsiaalvõrrandeid. Viimaste ilmne sarnasus elektrotehnika diferentsiaalvõrranditega, mis kirjeldavad voolu ja laengu liikumist, on aluseks akustiliste ning mehaaniliste süsteemide elektriliste aseskeemide koostamisele. Taolise nn. elektroakustilise ja -mehaanilise analoogia idee andis oma töödes juba Maxwell, kuid meetodi detailne väljatöötamine ja kohandamine arvutusteks toimus selle sajandi 20.-il ja 30.-il aastail seoses uute kõrgekvaliteediliste mikrofonide ja valjuhäälditе väljatöötamisega. Et insenerid olid harjunud kasutama elektrotehnikas vahelduvvoolu teoorias tuntud sümbolimeetodit ja komplekstakistuse mõistet [38], kohandasid nad selle keeruliste akustiliste ja mehaaniliste süsteemide analüüsiks ja sünteesiks.

Alustame meetodiga tutvumist joonisel 3.1 kujutatud mehaanilise võnkesüsteemi elektrilise aseskeemi koostamisega.



Joon. 3.1. Mehaaniline rööpvõnkesüsteem

Olgu keha massiga m (joon. 3.1) kinnitatud vedru külge, mille elastsustegur olgu C_M. Vedru teine ots olgu kinnitatud liikumatult. Keha võib liikuda vaid piki õlitatud juhtpuksi ehk juhikut hõõrdeteguriga r. Kehale mõjugu jõud F, mis muutugu siinuseliselt nurksagedusega $\omega = 2\pi f$:

$$F = F_m \sin \omega t.$$

Jõu mõjul hakkab keha võnkuma oma tasakaaluasendi ümber. Võnkumise arvutamisel lähtutakse Newtoni kolmandast seadusest [36, 52], et süsteemi reaktsioon ehk vastumõju on võrdne mõjuva jõuga.

Süsteemi reaktsioon koosneb siin kolmest jõust:

1) massi *inertsjõud* F_1, mis on massi m ja tema kiirenduse a korrutis: $F_1 = ma$;

2) õlitatud pindade vaheline viskoosne [36, 52] hõõrdejõud F_2, mis on hõõrdeteguri r ja keha kiiruse v korrutis: $F_2 = rv$;

3) vedru *elastsusjõud,* mis Hooke'i seaduse põhjal [36, 52] on võrdeline vedru deformatsiooniga:

$$F_3 = E_y x = \frac{x}{C_M} \tag{3.1}$$

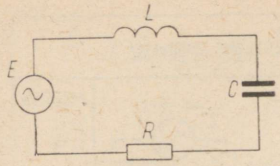
kus E_y — vedru elastsusmoodul e. jäikus (Youngi moodul), $C_M = 1/E_y$ — vedru elastsus(tegur), x — keha kaugus tasakaaluasendist.

Et kiirendus ja kiirus on väljendatavad tuletiste kaudu

$$a = \frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} \quad \text{ja} \quad v = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \tag{3.2}$$

siis Newtoni kolmanda seaduse põhjal

$$m\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2} + r\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} + \frac{x}{C_M} = F_m \sin \omega t. \tag{3.3}$$



Joon. 3.2. Mehaanilise rööpvõnkesüsteemi elektriline analoog

See valem on täiesti analoogiline elektrotehnikas laengu liikumist jadavõnkeringis (joon. 3.2) kirjeldava valemiga [38]:

$$L\frac{d^2q}{dt^2}+R\frac{dq}{dt}+\frac{q}{C}=E_m\sin\omega t, \tag{3.4}$$

kus L — induktiivsus, R — järjestikune aktiivtakistus, C — mahtuvus, E_m — mõjuva elektromotoorjõu amplituudväärtus, q — elektrilaeng.

Diferentsiaalvõrrandite sarnasuse tõttu on ka nende lahendid sarnased. Kui vool võnkeringis on teatavasti arvutatav valemiga

$$I_m=\frac{E_m}{Z}=\frac{E_m}{\sqrt{R^2+\left(\omega L-\frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \tag{3.5}$$

siis voolu mehaaniline analoog — kiirus — on arvutatav analoogilise valemiga:

$$v_m=\frac{F_m}{z}=\frac{F_m}{\sqrt{r^2+\left(\omega m-\frac{1}{\omega C_M}\right)^2}}, \tag{3.6}$$

kus $z=\sqrt{r^2+\left(\omega m-\frac{1}{\omega C_M}\right)^2}$ — mehaanilise süsteemi näivtakistus.

Süsteemi resonantsisagedusel

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{mC_M}} \tag{3.7}$$

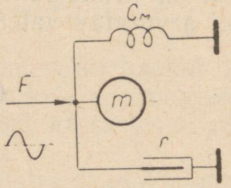
on mehaaniline takistus kõige väiksem ja võnkekiirus v_m kõige suurem.

Järgnevas tabelis (joon. 3.3) on kõrvutatud mehaanilised suurused ja nende elektrilised analoogid.

Kasutades mehaanika tingmärke, on joonisel 3.1 toodud võnkesüsteem kujutatav järgmiselt (joon. 3.4). Kõigil kolmel elemendil

Mehaanilised suurused			Elektrilised analoogid		
		Mõõtühik			Mõõtühik
Jõud	F	N	Emj. allikas	E	V
Kiirus	v	m/s	Vool	I	A
Nihe, paigutus	x	m	Laeng	q	C
Mass	m	kg	Induktiivsus	L	H
Elastsus	C_M	m/N	Mahtuvus	C	F
Hõõre	r	$\frac{N \cdot s}{m}$	Takistus	R	Ω

Joon. 3.3. Mehaanilised suurused ja nende elektrilised analoogid



Joon. 3.4. Mehaanilise rööpvõnkesüsteemi aseskeem

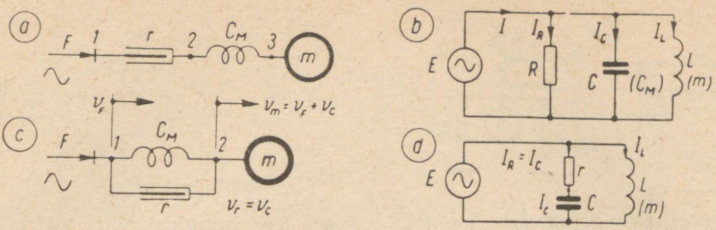
on siin sama paigutus x ja ka kiirus v. See on nn. mehaaniliste elementide *rööp-* ehk *sõlmlülitus*, millele vastab elektriline jadalülitus (joon. 3.2).

Mehaaniliste elementide jadalülitus on toodud joonisel 3.5.*a*. Lülitusele on iseloomulik, et vabalt (hõõrdumiseta) liikuvat massi m käitatakse siin läbi järjestikku ühendatud vedru C_M ja hõõrd- ehk friktsioonajami r. Perioodiline jõud $F = F_m \sin \omega t$ mõjub siin hõõrdajami otsale *1*. Et elemendid r, C_M ja m on ühendatud järjestikku, siis iga elemendi reaktsioon e. vastumõju peab võrduma mõjuva jõuga:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = R \frac{dx}{dt} = \frac{x}{C_M} = F_m \sin \omega t. \tag{3.8}$$

Analoogiline valem saadakse rööpvõnkeringi kohta (joon. 3.5.*b*), kus pinge igal elemendil võrdub vooluallika elektromotoorjõuga:

$$L \frac{d^2q}{dt^2} = R \frac{dq}{dt} = \frac{q}{C} = E_m \sin \omega t. \tag{3.9}$$



Joon 3.5. Mehaanilise jadalülituse elektriliseks analoogiks on rööpvõnkering

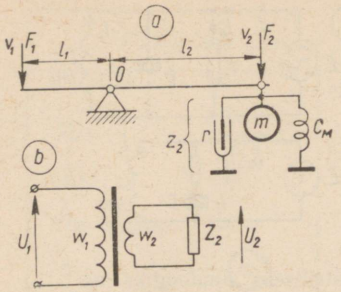
Valemite sarnasuse tõttu on ka nende lahendid sarnased, mis lubab siin kasutada elektrotehnikale omaseid arvutusmeetodeid ja järeldada, et mehaaniliste elementide jadalülituse analoogiks on elektriline rööplülitus.

Vedru või massi käitamist läbi friktsioonajami esineb elektromehaanilistes muundurites ja elektroakustikas harva. Palju sagedamini esineb massi käitamist läbi vedru, nagu näidatud joonisel 3.5.*c*. Helitehnikas esineb taoline juhtum näiteks heliplaadil oleva salvestuse taasestamisel, kus helipea ja selle hoidiku massi käitatakse läbi vetruva piesoelektrilise elemendi (§ 9.4). Reaalsetel vedrudel imiteeritakse materjali sisehõõrdumisest tingitud energiakadu kadudega vedruga paralleelselt ühendatud hõõrdajamis r. Et vedru ja takistus on ühendatud mehaaniliselt paralleelselt ja neil on sama kiirus, vastab sellele elektrilises aseskeemis r ja C jadaühendus, kus vool I on ühine (joon. 3.5.*d*). Kuna komplektiga rC_M on järjestikku ühendatud mass m, tuleb elektrilisel aseskeemil ühendada rC-ahelaga paralleelselt induktiivsus L (pinge E on ühine). Saadakse samuti rööpvõnkering hüveteguriga $Q = 1/\omega Cr = \omega L/r$. Järjestikune kaotakistus r on arvutatav ekvivalentseks paralleelseks kaotakistuseks. Valemi $R = Q\omega L = (\omega L)^2/r$ põhjal saadakse taolise mehaanilise süsteemi resonantsisagedusel $f_0 = 1 : (2\pi\sqrt{m\,C_M})$ sisendtakistuseks

$$R_{sis} = \frac{(2\pi f_0 m)^2}{r}. \qquad (3.10)$$

Nagu rööpvõnkeringilgi, on siin sisendtakistus resonantsisagedusel suur. Süsteem avaldab jõule F suurt takistust, mistõttu jõu rakenduspunkti 1 paigutus ja kiirus on väikesed. Seevastu vedru ja massi paigutus ning võnkekiirus (punkt 2) on palju suuremad ja nimelt hüvetegur Q korda.

On lihtne näha, et *kangülekande* elektriliseks analoogiks on trafo. Kangi otsal mõjuvad jõud F_1 ja F_2 (joon. 3.6.*a*) on teatavasti



Joon. 3.6. Kangülekanne (*a*) ja selle elektriline analoog — trafo (*b*)

pöördvõrdelised, otste kiirused v_1 ja v_2 aga võrdelised õlgade pikkustega:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{l_2}{l_1} = n. \tag{3.11}$$

Järelikult $F_2 = F_1/n$ ja $v_2 = v_1 n$, millest saadakse, et mehaaniline takistus z_2 taandub kangi teisele õlale suuruses

$$z_2 \frac{F_1}{v_1} = n^2 \frac{F_2}{v_2} = n^2 z_2. \tag{3.12}$$

Analoogiliselt on trafo sekundaarkoormus Z_2 (joon. 3.6.*b*) taandatav primaarpoolele, kusjuures kangi pikemale õlale l_2, kus jõud on väiksem, vastab trafo väiksema keerdude arvuga mähis w_2, kus pinge on madalam.

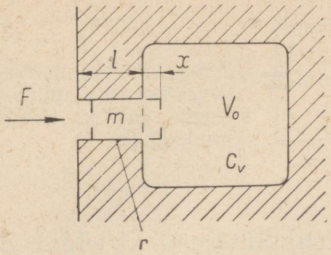
Reaalse kangi õlgade massile vastab trafo aseskeemis puisteinduktiivsus, õlgade elastsusele — trafo mähiste omamahtuvus. Massile, mille külge on kinnitatud kangi toetuspunkt 0, vastab trafo peainduktiivsus.

Akustilise süsteemi elektriline aseskeem. Lihtsaim akustiline võnkesüsteem on jäikade seintega piiratud õhuruum, milles on ava (joon. 3.7). Füüsikas [36, 52] on see tuntud *Helmholtzi* e. *akustilise resonaatorina*. Kui resonaatori mõõtmed on väikesed, võrreldes heli lainepikkusega, võib süsteemi vaadelda koondparameetrilisena. Nimelt välise helirõhu mõjul võngub õhk resonaatori kaelaosas kui jäik kolb massiga $m = \varrho_0 ls$, kus l ja s on vastavalt kaelaosa pikkus ja ristlõige.

Õhuosakeste ja kaela seinte vahel tekib seejuures hõõre [105, 119]

$$r = 8\pi\mu l, \tag{3.13}$$

kus $\mu = 1{,}8 \cdot 10^{-3}$ N · s/m² — õhu dünaamiline viskoossus. Metallist või muust soojust hästi juhtivast materjalist seinte puhul on viskoossus ja ka takistus kaks korda suuremad [105].



Joon. 3.7. Helmholtzi resonaator

Taolise õhkkolvi mõjul hakkab õhk õõnes V_0 perioodiliselt tihenema ja hõrenema ning käitub kui elastsus C_v. Et õhu võnkumine on kiire, toimub see adiabaatselt, s. t. ruumalas V_0 ei jõua toimuda soojusvahetust gaasiosakeste ja resonaatori seinte vahel ning seos õhurõhu p ja tiheduse ϱ vahel on

$$p\varrho^{-\varkappa} = \text{const}, \tag{3.14}$$

kus $\varkappa = 1{,}4$ — õhu adiabaatsuse tegur (erisoojuste C_p ja C_v suhe). Et gaasi tihedus ja maht on pöördvõrdelised, siis ka $pV^{\varkappa} = \text{const}$.

Olgu resonaatori kaelas õhkkolvi paigutus x, siis õõne ruumala muutus $\Delta V = xS$ ja selles tekkiv ülerõhk Δp on leitav valemist

$$p_0 V_0^{\varkappa} = (p_0 + \Delta p)(V_0 - \Delta V)^{\varkappa},$$

sest rõhu ja ruumala muutused on vastassuunalised. Viimane valem on teisendatav kujusse

$$\frac{p_0 + \Delta p}{p_0} = \left(\frac{V_0 - \Delta V}{V_0}\right)^{-\varkappa}$$

ehk

$$1 + \frac{\Delta p}{p_0} = \left(1 - \frac{\Delta V}{V_0}\right)^{-\varkappa} \approx 1 - \varkappa \frac{\Delta V}{V_0},$$

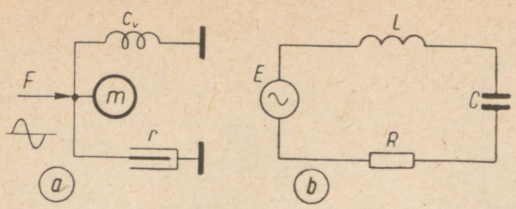
millest saadakse, et

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \varkappa \frac{\Delta V}{V_0} = \varkappa \frac{xS}{V_0}.$$

Arvestades, et resonaatori suudmes õhkkolvile mõjuv jõud $F = \Delta pS$, on leitav õõne elastsus kolvi nihke ja jõu jagatisena:

$$C_v = \frac{x}{F} = \frac{x}{\Delta pS} = \frac{V_0}{\varkappa p_0 S^2}. \tag{3.15}$$

Resonaatori aseskeemilt (joon. 3.8.*a*) on näha, et suudmele mõjuva jõu F tasakaalustab massi m inertsjõu, takistuse r hõõrde-



Joon. 3.8. Helmholtzi resonaatori mehaaniline aseskeem (*a*) ja elektriline analoog (*b*)

jõu ja elastsuse C_v elastsusjõu summa. Süsteemi kirjeldav diferentsiaalvõrrand on sarnane valemiga 3.1 ning elektriliseks analoogiks on jadavõnkering (joon. 3.8.*b*). Helmholtzi resonaatori resonantsisagedus valemi 3.7 põhjal

$$f_{0,H} = \frac{1}{2\pi\sqrt{mC_v}} = \sqrt{\frac{\varkappa p_0}{\varrho}}\sqrt{\frac{S}{lV_0}} = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{lV_0}}. \qquad (3.16)$$

kus c — heli kiirus õhus.

Seega Helmholtzi resonaator, mehaaniline rööpvõnkesüsteem ja elektriline jadavõnkering on üksteise analoogid — resonantsisagedusel on nende kõigi sisendtakistus väike ning võrdub süsteemi aktiivtakistusega.

Mõnikord kasutatakse akustiliste süsteemide arvutamisel õhkkolvi kiiruse v asemel nn. voo- e. ruumkiiruse $v_r = Sv$ mõistet ja mehaanilise takistuse r asemel nn. akustilist takistust, s. o. helirõhu ja vookiiruse suhet:

$$r_a = \frac{p}{v_r} = \frac{F}{SSv} = \frac{F}{v}\frac{1}{S^2} = \frac{r}{S^2}. \qquad (3.17)$$

Analoogiliselt saadakse, et nn. akustiline mass m_a ja akustiline elastsus C_a on vastavate mehaaniliste suurustega seotud järgmiselt:

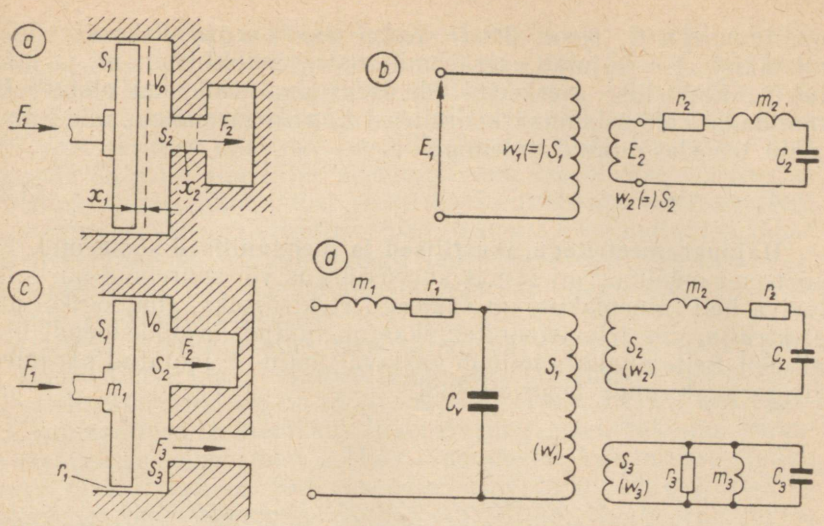
$$m_a = \frac{m}{S^2}, \quad C_a = C_M S^2. \qquad (3.18)$$

Kui resonaatori kaelaosa tugevalt lühendada, hakkab mõju avaldama ava ümbruses olev lisamass [36, 105]

$$m' = \frac{\varrho S^2}{D}, \qquad (3.19)$$

kus D — ava läbimõõt. Lühikese kaelaosa puhul on lisamass m' põhiline, millega tuleb arvestada resonaatori resonantsisageduse määramisel.

Elektroakustilistes muundurites esineb sageli *kambrikujuline* ruumala, milles võngub kolb (joon. 3.9). Kambri põhjas on üks või mitu ava. Taolise süsteemi analüüsiks oletame algul, et õhk kambris käitub kui kokkusurumatu vedelik. Olgu kambri maht V_0, kolvi



Joon. 3.9. Akustiline trafo ja selle elektriline analoog

pind S_1 ja põhjas üks ava, mille suudme pind on S_2 (joon. 3.9.*a*). Jõu F_1 mõjul liikugu kolb S_1 x_1 võrra, millest kambris tekkigu ülerõhk Δp. Ava S_2 suudmele mõjub nüüd jõud $F_2 = \Delta p S_2$. Et jõud $F_1 = S_1 \Delta p$, siis

$$\Delta p = \frac{F_1}{S_1} \quad \text{ja} \quad F_2 = \frac{F_1}{S_1} S_2 \quad \text{ehk} \quad \frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2} = n.$$

Seega töötab kamber jõudude transformeerijana ülekandesuhtega n. Kambri elektriliseks analoogiks on trafo, keerdude suhtega $w_2 : w_1 = n$ (joon. 3.9.*b*). Samal viisil saab kirjutada õhuosakeste paigutuse ja kiiruse kohta:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{x_2}{x_1} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2} = n, \tag{3.20}$$

milles analoogiliselt kangsüsteemile (valem 3.12) järeldub, et kambri väljundavas S_2 olev akustiline takistus z_2 on taandatav primaarpoolele (kolvi mehaaniliseks takistuseks) valemiga

$$z_2' = n^2 z_2. \tag{3.21}$$

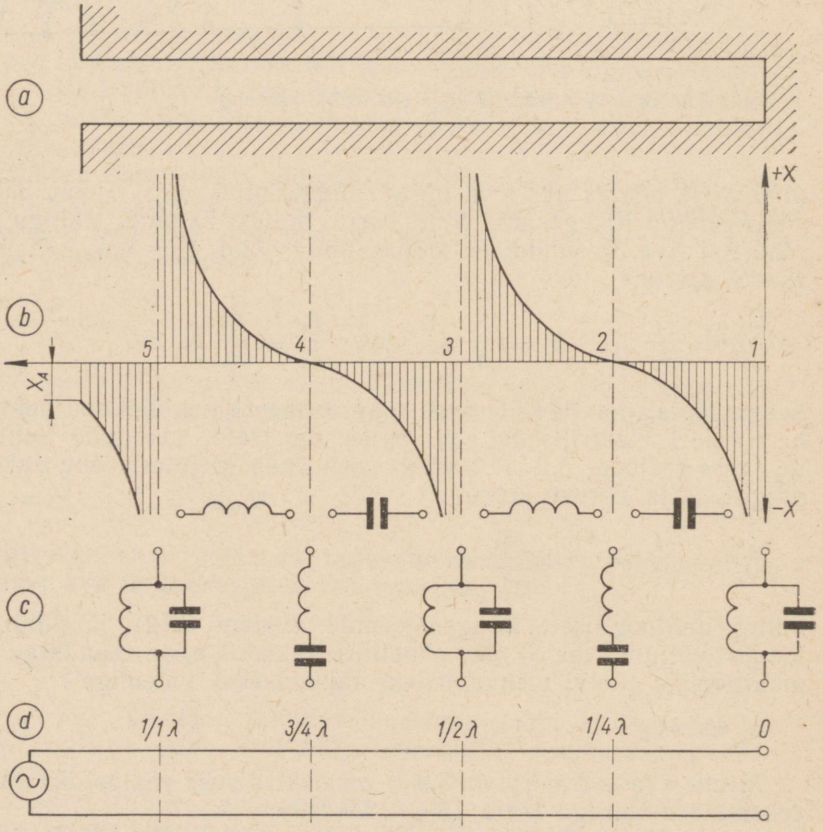
Mitme ava korral (joon. 3.9.*c*) on elektriliseks analoogiks mitme sekundaarmähisega trafo (joon. 3.9.*d*).

Et tegelikult õhk kambris on kokkusurutav, toimub ülekanne kolvilt väljundavasse õhupadja V_0 elastsusega C_v (valem 3.15), mis trafo aseskeemil võetakse arvesse primaarmähist šunteeriva

mahtuvusega C_v (joon. 3.9.*d*). Kolvi massi m_1 ja viskoosset liikumistakistust r_1 kujutab aseskeemil vastav induktiivsus m_1 ja takistus r_1. Elektrilise aseskeemi edasiseks analüüsiks on otstarbekas taandada trafo sekundaarkoormused Z_2 primaarpoolele, mis toimub trafo teoorias tuntud valemiga

$$Z_2' = n^2 Z_2. \tag{3.22}$$

Hajuparameetritega akustilised ja mehaanilised süsteemid. Kui süsteemi mõõtmed on samas suurusjärgus või suuremad kui selles leviva heli lainepikkus, on süsteemi elektriliseks analoogiks pikk elektriliin, mis televisioonitehnikas on tuntud ka pikksidendi nime all [66]. Selle analüüs toimub vastavalt haju- e. jaotatud parameetritega süsteemide teooriale [38].

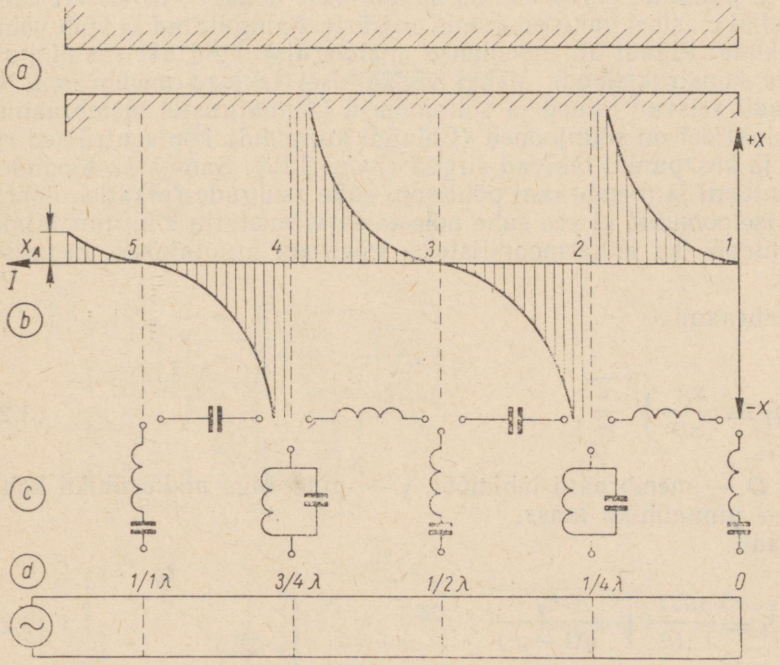


Joon. 3.10. Ühest otsast suletud toru ja selle elektriline analoog — tühijooksus pikk liin

Akustiliseks hajuparameetritega süsteemiks on toru, milles levib helilaine. Kui toru on ühest otsast suletud (joon. 3.10.*a*), siis seal peab õhuosakeste kiirus võrduma nulliga. Selle elektriliseks analoogiks on lõpus tühijooksus e. vallali olev pikk elektriliin, mille lõpus vool (kiiruse analoog) on null (joon. 3.10.*d*). Vastavalt toru pikkusele on selle akustiline sisendtakistus kas elastse või inertse iseloomuga ja sisendtakistuse elektriliseks analoogiks on vastavalt kas mahtuvus või induktiivsus (joon. 3.10.*b*). Veerandlainepikkuse toru sisendtakistus on väike nagu jadavõnkeringil (joon. 3.10.*c*), poollainepikkuse toru sisendtakistus aga suur nagu rööpvõnkeringil selle resonantsisagedusel.

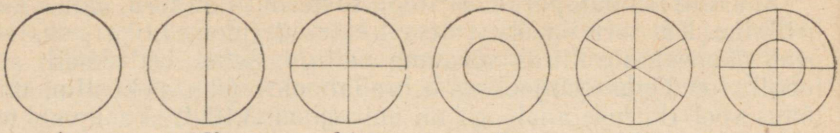
Mõlemast otsast avatud toru käitub kui lõpus lühistatud pikk liin (joon. 3.11). Veerandlainepikkuse toru sisendtakistus on suur. Selle elektriline analoog on rööpvõnkering (joon. 3.11.*c*). Helisageduse suurenemisel lainepikkus lüheneb ning sisendtakistus omandab elastse iseloomu (joon. 3.11.*b*). Sagedustel, kus torusse mahub täisarv poollaineid, on toru sisendtakistus väike, selle elektriline analoog on jadavõnkering.

Mehaaniliseks hajuparameetritega süsteemiks on pikk varras, mida mööda levib helilaine. Lõpus jäigale massiivsele alusele kin-



Joon. 3.11. Mõlemast otsast avatud toru ja selle elektriline analoog — lühistatud pikk liin

RAAMATUKOGU



Joon. 3.12. Sõlmjooned — Chladni kujundid — membraanil või plaadil

nitatud varda analoogiks on tühijooksus pikk liin, sest kinnituskohas on võnkekiirus kui voolu analoog null ja varda sisendtakistuse määramiseks saab kasutada joonist 3.11. Kui varras on lõpus koormatud mingi mehaanilise takistusega, on tema analoogiks vastava elektrilise takistusega koormatud pikk elektriliin.

Kasutades Kundti toru [36] mõõteliinina ja Smith-Volberti ringdiagrammi [29], on mõeldav akustiliste takistuste eksperimentaalne mõõtmine raadiotehnikas üldkasutataval meetodil.

Mehaanilised hajuparameetritega süsteemid on veel *membraanid* ja *plaadid*. Membraaniks nimetatakse õhukest, tavaliselt kettakujulist elastset vaheseina, mis on äärtest pingutatud ja võib vabalt võnkuda. Plaadi all mõeldakse analoogilist, kuid äärtest pingutamata konstruktsiooni. Vabal võnkumisel tekivad membraanil või plaadil seisvad lained ja sõlmjooned. Ümmargustel membraanidel ja plaatidel on sõlmjooned (Chladni kujundid) kontsentrilised ringid ja keskpunkti läbivad sirged (joon. 3.12). Samas on toodud ka ülemtooni ja membraani põhitooni suhe (sulgudes plaatide kohta). On iseloomulik, et see suhe pole täisarv, mistõttu siin nimetatakse ülemtoone ka anharmoonilisteks. Põhitoon arvutatakse järgmiselt [36]:

membraanil

$$f_I = \frac{2{,}4}{\pi D}\sqrt{\frac{\tau}{m}}, \tag{3.23}$$

kus D — membraani läbimõõt, τ — pindpinge pikkusühiku kohta, m — pinnaühiku mass;

plaadil

$$f_I = \frac{1{,}72d}{D^2}\sqrt{\frac{E_y}{\varrho(1-\mu^2)}}, \tag{3.24}$$

kus d — plaadi pikkus, ϱ — materjali tihedus, E_y — Youngi moodul, μ — Poissoni tegur.

Elektrilise analoogskeemi koostamise reeglid. Põhireegliteks on siin järgmised eespool selgunud tõigad.

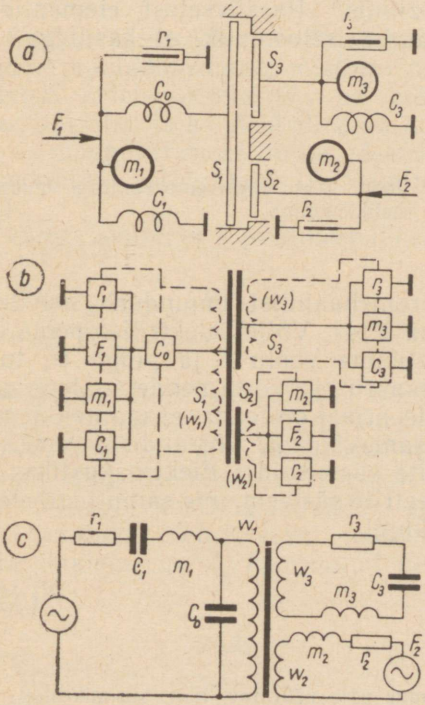
1. Akustiliste või mehaaniliste elementide rööp- e. sõlmlülitusele, mispuhul väline jõud tasakaalustatakse elementide vastumõjude summaga, vastab elektriline jadalülitus, kus jõu analoog — elektromotoorjõud — tasakaalustatakse elementide pingelangude summaga.

2. Mehaaniliste elementide jadalülitusele, kus iga elemendi vastumõju võrdub välisele jõule, vastab elektriline rööplülitus, kus igale elemendile mõjub sama pinge (jõu analoog).

Lisaks neile põhireeglitele on otstarbekas kasutada elektrilise analoogi koostamisel veel järgmisi juhiseid, mis on saadud elektrotehnikas tuntud duaalsete ahelate vastastikusest seosest lähtudes.

1. Koostada akustilis-mehaanilise süsteemi skeem (joon. 3.13.*a*). Akustiline trafo kujutada vastava kolbsüsteemina.

2. Mehaaniline skeem joonestada ümber, tähistades iga elemendi ja jõu lahtriga, millesse kirjutada elemendi tähis. Lahtrid ühendada kriipsjoontega, mis kulgegu risti mehaaniliste sidemetega ja moodustagu suletud ahelaid (joon. 3.13.*b*). Kriipsjooned ei tohi lõikuda mehaaniliste sidemetega ja suletud ahelad ei tohi haarata süsteemi liikumatuid («maandatud») punkte. Akustilise trafo iga



Joon. 3.13. Elektrilise analoogskeemi koostamine

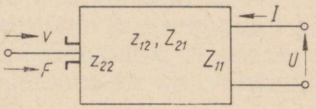
väljund teisendatakse teistest sõltumatu ahelana. Seejuures iga kolb asendada mähisega, mille keerdude arv w on võrdeline vastava kolvi pindalaga S. Mähis ristugu kolvi vardaga.

3. Kriipsjoontest moodustunud skeem joonestada ümber, kusjuures lahtrid asendada vastavate elektriliste analoogidega (joon. 3.13.*c*). Saadud mitmemähiselise trafo sekundaarkoormused on otstarbekas taandada primaarpoolele w_1, misjärel saadakse joonisel 4.16 kujutatud skeem.

Taolise elektrilise analoogskeemi analüüs ja sagedus- ning siirdekarakteristikute arvutamine toimub nüüd elektriahelate teoorias kasutatavate meetoditega.

3.2. ELEKTROMEHAANILINE MUUNDUR KUI NELIKLEMM

Elektromehaanilise muunduri ülesandeks on mehaanilise energia muundamine elektrienergiaks (näit. mikrofoni membraanile helirõhust põhjustatud jõu muundamine helisageduslikuks vahelduvpingeks) või elektrienergia muundamine mehaaniliseks energiaks (näit. valjuhääldi sisendklemmidele antava helisagedusliku pinge muundamine helirõhuks). Nii nagu elektrimootor võib töötada kas generaatorina või ajamina, on passiivsetest elementidest koostatud elektromehaaniline muundur pööratav, s. t. võib töötada kas generaatori- või ajamirežiimis.[1] Passiivsetest elementidest koostatud süsteemile on seejuures iseloomulik, et kasutegur on mõlemas režiimis sama.



Joon. 3.14. Elektromehaaniline muundur neliklemmina

Üldjuhul kujutatakse elektromehaanilist muundurit neliklemmina — «musta kastina» (joon. 3.14). Võttes elektrilise poole iseloomustussuuruseks ainuvõimalikuna voolu I ja pinge U, tuleb mehaanilise poole iseloomustussuuruseks võtta nende analoogid — kiirus v ja jõud F. Neliklemmi teooriast on teada, et iga neliklemmi kohta võib välja kirjutada 6 (samaväärset) võrrandisüsteemi (Z-, Y-, h-, g-, a- või b-parameetrite süsteemid). Elektroakustikas on neist üldkasutatavam Z-parameetrite süsteem, mis samuti kui elektrotehnikas kirjutatakse välja kujul

$$\left.\begin{aligned} U &= Z_{11}I + z_{12}v \\ F &= Z_{21}I + z_{22}v \end{aligned}\right\} \qquad (3.25)$$

[1] Mõni elektromehaaniline muundur pole pööratav, näit. süsimikrofon.

Eksperimentaalselt on neliklemmi parameetrid määratavad tühijooksu- ja lühisekatsetega nagu elektrotehnikaski:

1) elektrilise poole tühijooksul, kui $I=0$, saadakse esimesest valemist (3.25):

$$z_{12} = \frac{U}{v} \tag{3.26}$$

ja teisest valemist (3.25)

$$z_{22} = \frac{F}{v}; \tag{3.27}$$

2) pidurdatud muunduri puhul, kui $v=0$ (elektrilise tühijooksu analoog), saadakse esimesest valemist (3.25)

$$Z_{11} = \frac{U}{I}, \tag{3.28}$$

ja teisest valemist (3.25)

$$Z_{21} = \frac{F}{I}. \tag{3.29}$$

Seega vastastikused e. ühistakistused z_{12} ja Z_{21} iseloomustavad seadme muundusvõimet, mistõttu neid nimetatakse elektromehaanilisteks sideteguriteks. Z_{11} on pidurdatud muunduri elektriline sisendtakistus ja ka elektriline väljundtakistus generaatorirežiimis, z_{22} — muunduri mehaaniline sisendtakistus generaatorina ja ka mehaaniline väljundtakistus ajamina (elektrilise poole tühijooksul).

Olgu lisatud, et Y-parameetrite süsteemi

$$\left.\begin{aligned} I &= Y_{11}U + y_{12}F \\ v &= Y_{21}U + y_{22}F \end{aligned}\right\}$$

kasutamisel tuleb akustiliseks lühisekatseks, kus $F=0$, muundur (näit. valjuhääldi) paigutada vaakumkambrisse.

Niisiis on mistahes elektromehaaniline muundur pööratav neliklemm ning täielikult iseloomustatud oma kolme parameetriga (Z_{11}, z_{12}, z_{22}), mistõttu muunduri arvutamisel saab täiel määral ära kasutada olemasolevat neliklemmide teooriat. Näiteks lähtudes takistusega Z_t koormatud neliklemmi sisendtakistuse valemist [8]

$$Z_{sis} = Z_{11} - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_{22} + Z_t},$$

saab analoogia põhjal kohe välja kirjutada, et muunduri sisendtakistus ajamirežiimis

$$Z_{sis} = \frac{U_{sis}}{I_{sis}} = Z_{11} - \frac{z_{12}Z_{21}}{z_{22} + z_t} \tag{3.30}$$

ja generaatorirežiimis

$$z_{sis} = \frac{F_{sis}}{v_{sis}} = z_{22} - \frac{z_{12}Z_{21}}{Z_{11} + Z_t}. \tag{3.31}$$

Analoogiliselt on välja kirjutatavad ka valemid väljundtakistuste ja ülekandetegurite kohta. Näiteks ülekandetegurid on järgmised:
ajamirežiimis

$$K_{aj} = \frac{F}{U} = \frac{z_{12}z_t}{Z_{11}(z_{22} + z_t) - z_{12}Z_{21}}, \tag{3.32}$$

generaatorirežiimis

$$K_{gen} = \frac{U}{F} = \frac{Z_{21}Z_t}{z_{22}(Z_{11} + Z_t) - Z_{21}z_{12}}. \tag{3.33}$$

3.3. INDUKTIIVSED JA MAHTUVUSLIKUD MUUNDURID

Mehaanilise ja elektrilise energia vastastikune muundamine on võimalik vaid kas magnet- või elektriväljas tekkivate jõudude abil. Elektromehaanilisi muundureid, kus kasutatakse voolu ja magnetvälja vastastikusel toimel tekkivaid jõude, nimetatakse induktiivseiks. Muundureid, kus kasutatakse elektriväljas laengule mõjuvaid jõude, nimetatakse mahtuvuslikeks.

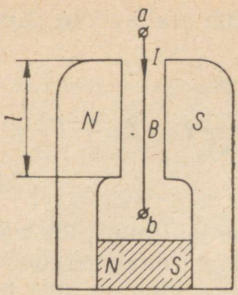
Induktiivsed muundurid jaotatakse elektrodünaamilisteks, elektromagnetilisteks ja magnetostriktsioonilisteks; mahtuvuslikud muundurid — elektrostaatilisteks ja piesoelektrilisteks.

Elektrodünaamiline muundur koosneb juhtmest *ab*, mis asub püsimagneti NS õhupilus (joon. 3.15) ja võib seal liikuda risti magnetvooga. Kui juhet läbib vool I ja magnetvoo tihedus pilus on B, siis mõjub juhtmele jõud

$$F = BlI, \tag{3.34}$$

kus l — juhtme magnetvoos asuva osa pikkus.

Sellel põhimõttel töötab elektrodünaamiline valjuhääldi.



Joon. 3.15. Elektrodünaamiline muundur

Kui juhe *ab* liigub kiirusega v, indutseeritakse selles emj.

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = -Blv, \tag{3.35}$$

s. t. muundur töötab generaatorina. Sellel põhimõttel rajaneb elektrodünaamilise mikrofoni talitlus.

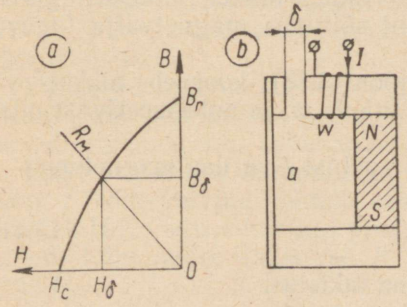
Valemite (3.26) ja (3.29) põhjal elektromehaanilised sideteguriid

$$z_{12} = \frac{E}{v} = -Bl = -Z_{21} \text{ kg/s}. \tag{3.36}$$

Elektromagnetiline muundur sisaldab pooli w ja magnetahela (joon. 3.16). Magnetahel koosneb püsimagnetist NS, poolusekingadest ja elastsest ferromagnetilisest plaadist (ankrust) *a*, mille vaba ots võib võnkuda ning seega muuta magnetahela õhupilu δ laiust. Tekitagu püsimagnet NS magnetahelas (ja ka õhupilus) magnetvoo

$$\Phi_0 = S_\delta B_\delta \frac{H_\delta \delta}{R_M}, \tag{3.37}$$

kus S_δ — õhupilu ristlõikepind, $R_M \approx \delta/\mu_0 S$ — magnetahela magnetiline takistus, B_δ ja H_δ — magnetvoo tihedus ja magnetvälja tugevus õhupilus (joon. 3.16.*a*), mis leitakse graafiliselt [37]. Kui pooli keerdude arvuga w läbib vahelduvvool $i = I_m \sin \omega t$, tekib õhu-



Joon. 3.16. Elektromagnetiline muundur

pilus vahelduvvoog $\Phi_{\sim} \approx = i_{\sim} w/R_M$, mis liitub alalisvoole. Ankru ja poolusekinga vaheline tõmbejõud

$$F = \frac{(\Phi_0 + \Phi_{\sim})^2}{2\mu_0 S_\delta} = \frac{\Phi_0^2}{2\mu_0 S_\delta} + \frac{\Phi_0 \Phi_{\sim}}{\mu_0 S_\delta} + \frac{\Phi_{\sim}^2}{2\mu_0 S_\delta} = F_0 + F_1 + F_2, \tag{3.38}$$

kus $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m — vaakumi magnetiline läbitavus. On näha, et peale alaliskomponendi F_0 tekib siin kasulik, signaalisagedusega jõud F_1, kuid ka kahekordse signaalisagedusega jõud F_2, mis põhjustab mittelineaarmoonutust.

Sellel põhimõttel töötavad elektromagnetiline valjuhääldi, peatelefonid ja mehaanilise helisalvestuse lõikepead ehk rekorderid.

Kui ankru vaba ots panna võnkuma amplituudiga x_m, muutub õhupilu laius ja ka magnetahela takistus R_M ning magnetvoo tihedus B_δ (joon. 3.16.*a*) ning mähises indutseeritakse emj. [73]

$$E = -w \frac{d\Phi}{dt} \approx -\frac{\mu_0 H_\delta S_\delta w}{(\delta + x_m)^2} v_m. \tag{3.39}$$

Ka siin tekib mittelineaarmoonutus, mida püütakse vähendada, valides $x \ll \delta$.

Sellel põhimõttel töötavad mehaanilise helisalvestuse elektromagnetilised taasestuspead ja mõnedes megafonides kasutatavad elektromagnetilised mikrofonid.

Mittelineaarmoonutuse tõttu pole elektromagnetiline muundur kasutatav kõrgekvaliteedilises helitehnikas.

Magnetostriktsioonmuunduris kasutatakse magnetostriktsiooniefekti, s. o. ferromagnetilisest materjalist varda omadust lüheneda või pikeneda magnetvälja toimel. Magnetostriktsiooniefekt on pööratav: mehaanilisest deformatsioonist Δl jõu F mõjul tekib vardas pikkusega l magnetomotoorjõud Hl ja magnetvoog Φ, kusjuures nn. magnetostriktsioonitegur

$$\Psi = \frac{F}{\Phi} = \frac{Hl}{\Delta l}. \tag{3.40}$$

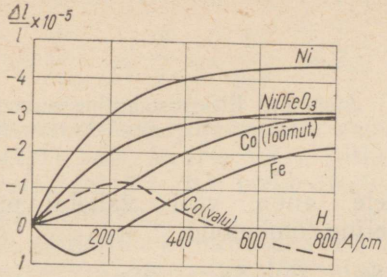
Kasutatavamate materjalide (raud, nikkel, koobalt, ferriit $NiOFeO_3$) suhtelise deformatsiooni sõltuvus magnetvälja tugevusest on toodud joonisel 3.17 [136].

Magnetostriktsioonmuundur (joon. 3.18) koosneb nikkel- või ferriitvardast l, millele on keritud mähis w, ja polariseerivast püsimagnetist NS.

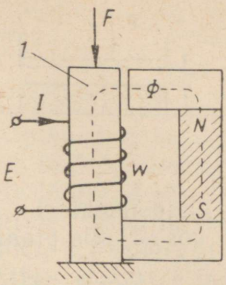
Töötamisel ajamirežiimis tekib voolust I vardas magnetvoog

$$\Phi_{\sim} = \frac{wI}{R_M}, \tag{3.41}$$

kus R_M — magnetahela magnetiline takistus.



Joon. 3.17. Kasutatavamate materjalide magnetostriktsioonkarakteristikud



Joon. 3.18. Polariseeritud magnetostriktsioonmuundur

Pidurdatud varda puhul tekib vardas valemi 3.40 põhjal jõud

$$F = \Phi_{\sim} \Psi = \frac{wI}{R_M}. \tag{3.42}$$

Deformeeritagu varrast töötamisel generaatorirežiimis siinuseliselt: $x = x_m \sin \omega t$; siis tekib vardas mmj. $Hl = \Psi x$ ja magnetvoog $\Phi_{\sim} = Hl/R_M = \Psi x/R_M$. Vahelduvast magnetvoost indutseeritakse mähises w emj.

$$E = -w \frac{d\Phi_{\sim}}{dt} = -\frac{w\Psi}{R_M} \cdot \frac{dx}{dt} = -\frac{w\Psi}{R_M} v_m, \tag{3.43}$$

kus v_m — varda vaba otsa võnkekiiruse amplituudväärtus.

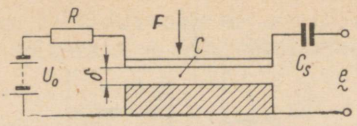
Valemite 3.42 ja 3.43 põhjal magnetostriktsioonmuunduri elektromehaaniline sidetegur

$$z_{12} = \frac{E}{v_m} = -\frac{w\Psi}{R_M} = -Z_{21}. \tag{3.44}$$

Magnetostriktsioonmuundureid kasutatakse tehiskaja seadmeis (vt. 10. ptk.), elektromehaanilistes filtrites, ultrahelitehnikas ja hüdroakustikas.

Välise püsimagneti asemel võib muundur olla polariseeritud varda enda jääkinduktsioonist. Polariseerimata muundur deformeerub ergutusvoolu kahekordse sagedusega.

Elektrostaatiline muundur kujutab endast kondensaatorit, mille plaat *1* võib kolvina liikuda teise, paigalseisva plaadi *2* suhtes (joon. 3.19). Olgu kummagi plaadi pindala S ja plaatide vahekaugus δ. Läbi suure takistuse R laetakse kondensaator alalispingeni U_0.



Joon. 3.19. Elektrostaatiline muundur

Kui kondensaatori plaatidele anda veel vahelduvpinge $u_\sim = U_\sim \cos \omega t$, siis plaatidevaheline tõmbejõud

$$F_c(t) = \frac{(U_0 + u_\sim)^2 S\varepsilon_0}{2\delta^2} = \frac{U_0 S\varepsilon_0}{2\delta^2} + \frac{U_0 u_\sim S\varepsilon_0}{\delta^2} + \frac{u^2 S\varepsilon_0}{2\delta^2}, \quad (3.45)$$

kus ε_0 — vaakumi dielektriline läbitavus.

Samuti nagu elektromagnetilise muunduri puhul koosneb ka siin jõud kolmest komponendist. Arvestades, et plaatidevaheline mahtuvus $C = \varepsilon_0 S/\delta$ ja vool läbi selle

$$I_\sim = \mathrm{j}U_\sim \omega C = \mathrm{j}U_\sim \omega\varepsilon_0 S/\delta, \quad (3.46)$$

saadakse kasuliku jõu efektiivväärtuseks

$$F_c = \frac{U_0 U_\sim S\varepsilon_0}{\delta^2} = \frac{U_0}{\omega\delta} I_\sim . \quad (3.47)$$

Sellel põhimõttel töötab elektrostaatiline e. kondensaatorvaljuhääldi.

Kui liikuv plaat panna siinuseliselt võnkuma, nii et tema paigutus tasakaaluasendi suhtes on $x = x_m \sin \omega t$, siis plaatidevaheline mahtuvus

$$C' = \frac{\varepsilon_0 S}{\delta + x}.$$

Eeldades, et kondensaatori laeng $Q_0 = U_0 C$ on konstantne (kondensaator ei jõua tühjeneda läbi suure takistuse R), on pinge kondensaatoril

$$U_c = \frac{Q_0}{C'} = \frac{U_0 C}{\varepsilon_0 S}(\delta + x) = U_0 + \frac{U_0 x_m}{\delta} \sin \omega t = U_0 + e_\sim . \quad (3.48)$$

Et plaadi võnkekiirus on paigutuse tuletis $v = \omega x_m \cos \omega t$, siis muunduri kasuliku väljundpinge amplituud

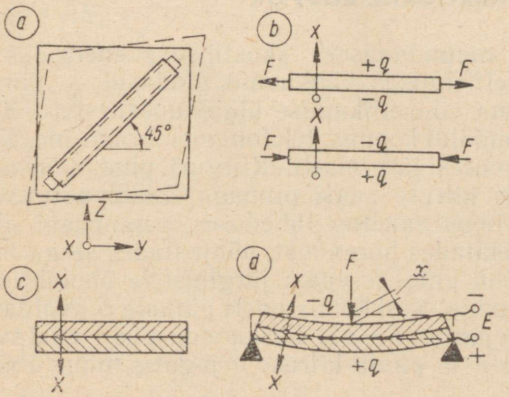
$$E_\sim = \frac{U_0 x_m}{\delta} = \frac{U_0}{\mathrm{j}\omega\delta} v_m. \quad (3.49)$$

Sellel põhimõttel töötab kondensaatormikrofon.

Elektrostaatilise muunduri elektromehaaniline sidetegur

$$z_{12} = \frac{E_{\sim}}{v_m} = \frac{F}{I} = \frac{U_0}{j\omega\delta} = Z_{21}. \qquad (3.50)$$

Piesoelektrilises muunduris kasutatakse mõnedest kristallidest (Segnette'i sool, kvarts SiO_2, liitiumsulfaat Li_2SO_4, ammooniumdihüdrofosfaat jt.) risti elektrilisele X-teljele lõigatud plaatide või siis piesokeraamiliste, s. o. polükristallide (baariumtitanaat $BaTiO_3$, pliitsirkooniumtitanaat $PbO\text{-}ZrO_2\text{-}TiO_2$ jt.) pulbri ja plastifikaatori segust pressitud, lõõmutatud ja välises elektriväljas jääkpolariseeritud plaatide omadust deformeeruda pindlaengu toimel. Piesoelektriline efekt on pööratav: plaatide deformeerimisel tekib nende pinnale elektrilaeng, tingituna materjali elementaardipoolide orienteerumisest ja plaadi summaarse dipoolmomendi muutumisest mehaanilise pinge mõjul.



Joon. 3.20. Senjettsoola ($NaKC_4HO_6 \cdot H_2O$) kristallist 45° X-lõige (*a*) ja selle deformeerimine (*b*); bimorfse elemendi konstruktsioon (*c*) ning deformeerimine (*d*)

Muunduriks kasutatakse tavaliselt nn. bimorfset elementi, mis saadakse kahe vastassuunaliselt polariseeritud plaadi kokkuliimimisel (joon. 3.20). Elemendi välispinnad kaetakse õhukese hõbedakihiga. Jõust F põhjustatud deformatsioonist x üks plaat lüheneb, teine pikeneb, mistõttu elemendi vastaspindade vahel tekib laengust q pinge E, kusjuures [132, 133]

$$\frac{F}{q} = \frac{E}{x} = \Pi A, \qquad (3.51)$$

kus Π — materjali iseloomustav piesoelektriline tegur, A — plaatide mõõtmetest sõltuv kordaja.

Siinuselise deformatsiooni puhul amplituudiga x_m võnkekiiruse amplituud $v_m = j\omega x_m$ ja elektromehaaniline sidetegur

$$z_{12} = \frac{E}{v_m} = \frac{\Pi A x_m}{j\omega x_m} = \frac{\Pi A}{j\omega} = Z_{21}. \qquad (3.52)$$

on imaginaarne, tingituna pinge ja võnkekiiruse vahelisest faasinihkest 90°, mis on iseloomulik ka elektrostaatilisele muundurile.

Piesoelektrilist muundurit kasutatakse mikrofonides, helipeades ja valjuhääldites.

Vaadeldud muundurite sisendtakistus sõltub nende konstruktsioonist ja koormustakistusest, väljundtakistus aga muunduri sisendit toitva (käitava) generaatori takistusest. Seepärast on järgnevalt lähemalt vaadeldud seadmeid, mis on muundurile koormuseks või toitvateks generaatoriteks.

3.4. KERA- JA KOLBKIIRGURID. RUUPOR

Mehaanilise energia muundamiseks akustiliseks energiaks — heliks — kasutatakse helitehnikas võnkuvaid pindasid — kiirgureid —, mis annavad oma võnkeliikumise üle õhuosakestele. Kiirguriteks on näiteks valjuhääldi koonus, telefoni membraan jne. Kiirgusprotsess toimub seejuures järgmiselt. Kiirguri pind, võnkudes kiirusega v, annab sama kiiruse edasi pinnaga kokkupuutuvatele õhuosakestele, surudes oma vahetus läheduses paiknevaid õhukihte kord kokku, kord tekitades hõrendust, põhjustades seega helirõhu p. See kiirus ja rõhk antakse edasi järgmistele õhukihtidele ning levib helilainena ruumis. Keskkonna poolt pinnale S avaldatav jõud e. reaktsioon on seejuures $F = pS$. Keskkonna poolt avaldatavat takistust, mis on jõu F ja pinna kiiruse v jagatis, nimetatakse kiirgustakistuseks:

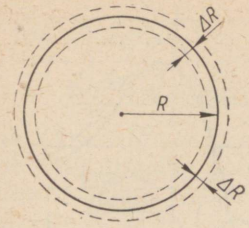
$$z_k = \frac{F}{v} = \frac{pS}{v}. \qquad (3.53)$$

Kui jõud (helirõhk) ja kiirus pole faasis, vaid on nihutatud nurga φ võrra, on kiirgustakistus kompleksne, koosnedes reaalosast r_k ja imaginaarosast X_k:

$$\dot{z}_k = \frac{p_m S}{v_m}(\cos\varphi + j\sin\varphi) = r_k + jX_k. \qquad (3.54)$$

Analoogiline on teatavasti olukord elektrotehnikas, kus komplekstakistust $\dot{Z} = Ze^{j\varphi}$ läbiv vool I on pinge U suhtes nihutatud nurga φ võrra. Kui elektrotehnikas aktiivvõimsus arvutatakse valemiga $P = UI\cos\varphi = 0{,}5\,U_m I_m \cos\varphi = 0{,}5\,I_m^2 Z\cos\varphi$, siis kiirguv akustiline võimsus arvutatakse samalaadse valemiga

$$P_a = 0{,}5 p_m v_m \cos\varphi = 0{,}5 v_m^2 z_k \cos\varphi = 0{,}5 v_m^2 r_k. \qquad (3.55)$$



Joon. 3.21. Kerakiirgur

Kiirgustakistust on lihtne arvutada *pulseerival kerakiirguril* (joon. 3.21), mille raadius R perioodiliselt (helisagedusega) muutub ΔR võrra. Taoline kiirgus kiirgab ühtlaselt kõigis suundades, kusjuures kiirguv helilaine on ilmselt keralaine, kus helirõhk ja õhuosakeste võnkekiirus on faasis nihutatud nurga φ võrra. Keralaine valemist (1.4) on näha, et vahetult kiirguri pinnal, kus kaugus $x=R$,

$$\cos\varphi = \frac{kR}{\sqrt{1+(kR)^2}}; \quad \sin\varphi = \sqrt{1-\cos^2\varphi} = \frac{1}{\sqrt{1+(kR)^2}}.$$

Analoogiliselt on valemist (1.4) määratav ka helirõhu ja kiiruse amplituudide suhe kiirguri pinnal, mis valemisse 3.54 asetatult annab kerakiirguri kiirgustakistuseks

$$\dot{z}_{k0} = \varrho cS\frac{(kR)^2}{1+(kR)^2} + j\varrho cS\frac{kR}{1+(kR)^2} = \varrho cS(b_0 + ja_0), \quad (3.56)$$

kus $S=4\pi R^2$ — kerakiirguri pindala, $k=2\pi/\lambda$ — lainearv.

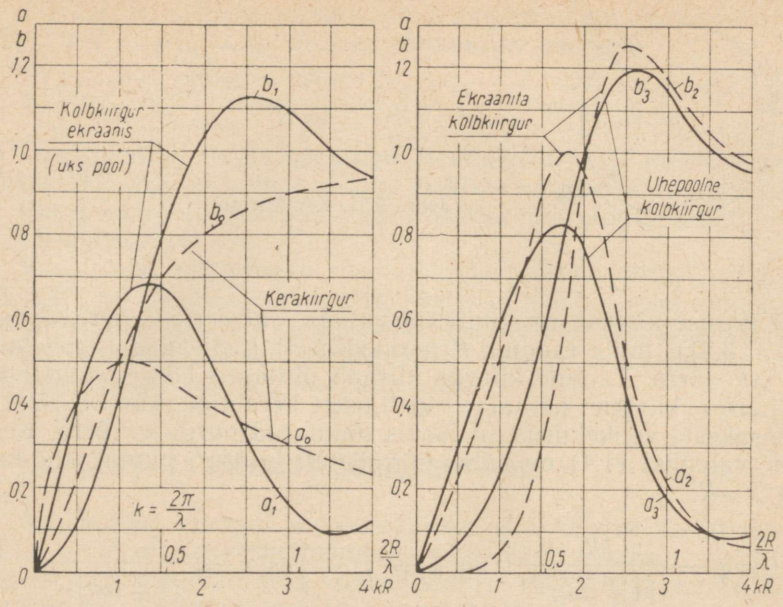
Dimensioonita tegurite b_0 ja a_0 sõltuvus korrutisest kR on toodud joonisel 3.22 (kriipsjoonega). Kiirguv akustiline võimsus valemi 3.55 põhjal

$$P_a = 0{,}5v_m^2 r_{k0} = 0{,}5v_m^2\varrho cSb_0 \quad (3.57)$$

on võrdeline teguriga b_0. Kiirgustakistuse imaginaarne komponent akustilise võimsuse väljakiirgamist ei põhjusta ja on kui mingi massi m_k mehaaniline takistus, sest

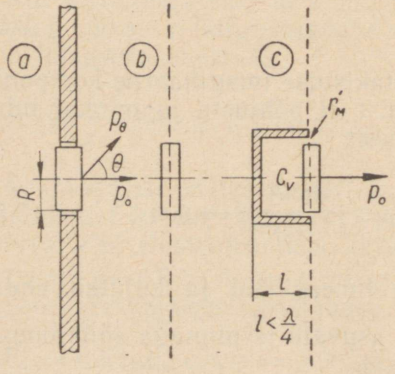
$$\varrho cS\frac{kR}{1+(kR)^2} = \frac{\varrho cS\omega R}{c[1+(kR)^2]} = \frac{\omega\varrho SR}{1-(kR)^2} = \omega m_k. \quad (3.58)$$

Tegur $\frac{SR}{1+(kR)^2}$ omab massi dimensiooni ja kujutab endast kiirguri pinna vahetus läheduses asuvate ja pinnaga sünkroonselt kaasavõnkuvate õhuosakeste massi.



Joon. 3.22. Mitmesuguste kiirgurite suhteliste kiirgustakistuste sõltuvus korrutisest $kR=2\pi R/\lambda=\omega R/c$

Kolbkiirguriks nimetatakse ümmargust ketast, mis võngub risti oma pinnaga. Kolbkiirgur võib olla paigutatud kas tasapinnalise ekraani avasse (joon 3.23.*a*), võnkuda ilma ekraanita — vabas ruumis (joon. 3.23.*b*) — või paikneda ühest otsast avatud silindri avas (joon. 3.23.*c*). Lõpmatult suures ekraanis võnkuva kolbkiirguri kiirgustakistuse määras Rayleigh [54]:



Joon. 3.23. Kolbkiirgurid

$$\dot{z}_{k1} = 2\varrho cS\left[1 - \frac{\mathbf{I}_1(2kR)}{kR}\right] + j2\varrho cS\frac{H_1(2kR)}{kR} =$$

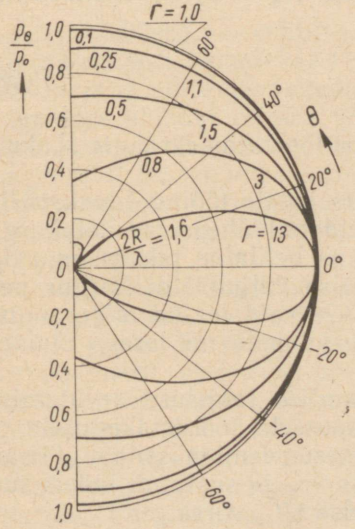
$$= 2\varrho cS(b_1 + ja_1), \qquad (3.59)$$

kus $2S = 2\pi R^2$ — kiirguri mõlema poole pindala (sest kiirgur kiirgab oma mõlema poolega); $\mathbf{I}_1(2kR)$, $H_1(2kR)$ — Besseli ja Struwe esimest järku funktsioonid argumendist $2kR$ [20]. Dimensioonita tegurite b_1 ja a_1 sõltuvus korrutisest $kR = 2\pi R\lambda^{-1}$ on toodud joonisel 3.22. Graafikult on näha, et madalatel sagedustel, kus heli lainepikkus $\lambda \gg R$, on kiirgustakistuse aktiivkomponent (ja ka kiiratav helivõimsus) väike. Kõrgetel helisagedustel, kus $\lambda \ll R$, kiirgustakistus läheneb oma piirväärtusele $r_{k1}(\infty) = 2\varrho cS$, mis valemi 1.3 põhjal kujutab keskkonna takistust kahele poole pinda S tasapinnalise laine puhul.

Kolbkiirguri iseärasuseks on, et kiirgus on suunatud, eriti kõrgetel sagedustel. Suunakarakteristiku tegur $D(\Theta)$ kui nurga Θ suunas kiirguva helirõhu $p(\Theta)$ suhe teljesuunalisse $p(0)$ avaldub siin valemiga

$$D(\Theta) = \frac{p(\Theta)}{p(0)} = \frac{2\mathbf{I}_1(kR\sin\Theta)}{kR\sin\Theta}, \qquad (3.60)$$

kus $\mathbf{I}_1(kR\sin\Theta)$ — esimest järku Besseli funktsioon argumendist $kR\sin\Theta$ [20]. Suunakarakteristik kiirguri ühe poole kohta on kujutatud joonisel 3.24. On näha, et madalatel sagedustel ($2R \leqslant 0{,}25\lambda$) on kiirgusintensiivsus kõikides suundades praktiliselt sama, kuid kõrgetel sagedustel, kus $R > \lambda$, küllaltki teravalt teljesihiliselt suunatud.



Joon. 3.24. Kolbkiirgur lõpmatus ekraanis. Suunakarakteristikud ja telgkontsentratsioonitegurid

Ilma ekraanita, vabas ruumis võnkuva kolbkiirguri (joon. 3.23.*b*) kiirgustakistus arvutatakse valemiga (Gutin 1937. a. [98, 105])

$$\dot{z}_{k2} = r_{k2} + j\omega m_{k2} = \varrho c S(b_2 + ja_2), \tag{3.61}$$

kus tegurite b_2 ja a_2 sõltuvus korrutisest kR on toodud joonisel 3.22 (kriipsjoonega). Ekraanita kolb töötab madalatel sagedustel väheefektiivselt (tegur b_2 väike), tingituna esi- ja tagakülje pool vastandfaasis kiiratud helilainete interferentsist. Nimelt surub võnkuv kolb oma ühel poolel õhu kokku ja samal ajal teisel poolel tekitab hõrenduse. Kui $R \ll \lambda$, levivad need vastandfaasilised helilained ümber kolvi ja liitudes hääbuvad. Ekraanita kolb vaid surub õhku oma ühelt küljelt teisele ja kasutult kaasavõnkuva õhu mass m' (tegur a_2) on siin märksa suurem kui varemvaadeldud kiirguritel.

Silindrilise kapsli avas töötava kolbkiirguri puhul on eeldatud, et kapsli sügavus $l < 0{,}25\lambda$; siis kapsli kui ühest otsast suletud toru sisendtakistus (joon. 3.10) mõjub kolvi tagaküljele kui elastsus C_v ning kiirgajana toimib vaid kolvi esipind. Kujunev heliväli on samasugune kui ekraanita kolbkiirguri heliväli, millel puudub tagakülje poolt kiiratud komponent. Umbes taoline heliväli saadakse, kui liita ekraanita ja lõpmatu ekraaniga kiirgurite heliväljad; tegurid b_3 ja a_3 on siis ligikaudu vastavalt tegurite b_1, b_2 ja a_1, a_2 aritmeetilised keskmised. Kiirgustakistus

$$\dot{z}_{k3} = r_{k3} + j\omega m_{k3} = \varrho c S(b_3 + ja_3). \tag{3.62}$$

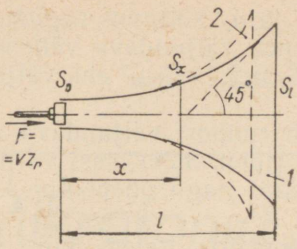
Tegurite b_2 ja a_2 täpsed väärtused on toodud joonisel 3.22 [98, 105]. Madalatel sagedustel, kus $kR \leqslant 2$, on tegur b_2 aproksimeeritav ruutsõltuvusega

$$b_2 \approx 0{,}25(kR)^2 = \frac{0{,}5\pi(Rf)^2}{c^2}. \tag{3.63}$$

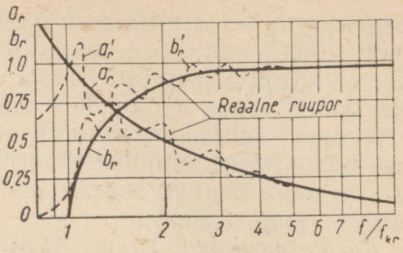
Kiirguri suunakarakteristik on sarnane lõpmatus ekraanis võnkuva kiirguri omaga (joon. 3.24).

Raadiovastuvõtja või kõlari kinnises kastis töötav *koonusvaljuhääldi* (vt. joon. 5.5) sarnaneb kirjeldatud ühepoolse kolbkiirguriga, eriti madalamatel sagedustel, kus helilaine pikkus on palju suurem kasti mõõtmetest. Kuigi reaalse valjuhääldi kiirgur pole tasapinnaline, vaid koonus, avaldab see vaid teatud mõju suunakarakteristikule, mis kõrgetel sagedustel pole nii terava suunatlusega.

Valjuhääldi võnkesüsteemi mehaanilise takistuse arvutamisel tuleb arvestada, et mehaanilisele viskoossele hõõrdetakistusele r_M' lisandub nüüd kiirgustakistus r_{k2}. Võnkesüsteemi massile m_M' lisandub kaasavõnkuvate õhuosakeste mass m_{k2} ja süsteemi jäikus suureneb kasti kui suletud õhuruumi jäikuse $1/C_v$ võrra.



Joon. 3.25. Eksponentsiaalruupor *1* ja keralaineruupor *2*



Joon. 3.26. Ruupori suhtelise sisendtakistuse sõltuvus sagedusest

Ruupor on jäikade seintega torujas helijuht, mille ristlõige sujuvalt suureneb. Akustiliselt kõige otstarbekamateks on osutunud eksponentsiaalruupor ja keralaineruupor.

Eksponentsiaalruupori ristlõige S suureneb eksponentsiaalselt:

$$S = S_0 e^{\delta x}, \tag{3.64}$$

kus S_0 — ruupori sisendava pindala, milles asub kolbkiirgur (joon. 3.25); δ — ruupori laienemistegur (eksponenditegur); x — ristlõike kaugus ruupori sisendist.

Lõpmatult pika eksponentsiaalruupori sisendtakistuseks on saadud [133]

$$\dot{z}_r = \varrho c S \sqrt{1 - \frac{f_{kr}}{f} + j\frac{f_{kr}}{f}} = \varrho c S (b_r + j a_r), \tag{3.65}$$

kus $f_{kr} = 0{,}0796 \delta_c$ — kriitiline sagedus. Sellise takistusega on koormatud ruupori sisendavas töötav kolbkiirgur. Sisendtakistuse tegurite b_r ja a_r sõltuvus sagedusest on toodud graafikul (joon. 3.26). Sageduse ühikuks on siin võetud kriitiline sagedus f_{kr}. Graafikust ja valemist 3.65 selgub, et kriitilisest sagedusest madalamatel helisagedustel on ruupori sisendtakistuse aktiivkomponent null ja kiirgumist ei toimu (helilaine levimine ruuporis pole võimalik). Füüsikaliselt see tähendab, et kõik õhuosakesed ruuporis võnguvad ühisfaasiliselt.

Helitehnikas tegelikult kasutatavad ruuporid on lõpliku pikkusega l, mispuhul valemi 3.64 põhjal ruupori väljundava ristlõige $S_1 = S_0 \exp \delta l$. Et ruupori lainetakistus erineb vaba keskkonna lainetakistusest, peegeldub osa helienergiast ruupori väljundavast ja levib tagasi ruupori sisendavasse, mõjutades sisendavas töötava kolbkiirguri tööd. Lõpliku pikkusega ruupori sisendtakistuse tegurite b_r' ja a_r' sõltuvus sagedusest juhul, kui väljundava $S_1 = 2{,}7\, c^2/\omega_{kr}^2$, on toodud joonisel 3.26 punktiiris. On näha, et reaalne ruupor kiirgab ka kriitilisest madalamatel sagedustel, sest

peegeldunud laine tõttu pole tegurite b_r' ja a_r' sõltuvus sagedusest enam monotoonne. See ebaühtlus suureneb väljundava vähenemisel, mistõttu on soovitatav alati valida $S_1 \geqslant 2{,}7\ c^2/\omega_{kr}^2$ ehk väljundava läbimõõduks $d_1 \gg 1{,}86/\delta$ [56].

Ruupori suunakarakteristik sarnaneb ruupori väljundava suuruse kolbkiirguri suunakarakteristikuga (joon. 3.24), sest väljundavas võnkuv õhukiht töötab teatud määral nagu ühepoolne kolbkiirgur (joon. 3.23.*c*).

Keralaineruupor (joon. 3.25) on mõnevõrra lühem, kuid suurema väljundavaga kui eksponentsiaalne ruupor. Siin suureneb eksponentsiaalselt ruuporis leviva keralaine pindala. Sujuvama ülemineku tõttu väliskeskkonda peegeldumist välisavast ei toimu ja sageduskarakteristik madalatel sagedustel pole nii ebaühtlane kui eksponentsiaalsel ruuporil. Keralaineruupori konstrueerimisjuhised on toodud kirjanduses [56].

Helitehnikas kasutatakse ruuporit ka *võimendava vastuvõtuseadmena.* Suunatuna oma suurema avaga heliallika poole, koondab ruupor leviva helilaine oma kitsamasse kaelaossa, mistõttu seal helirõhk suureneb. Analüüsides ruuporit kui lineaarset pööratavat neliklemmi, on leitud [133], et kõrgetel sagedustel ruupori helirõhu võimendustegur

$$K = 2\frac{D}{d},$$

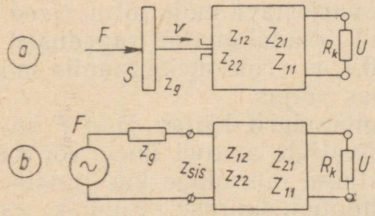
kus D ja d on vastavalt ruupori suurema ja väiksema ava läbimõõdud. Võimendusteguri sõltuvus sagedusest on sarnane teguri b_r' sagedussõltuvusele (joon. 3.26), selle ainsa vahega, et väga madalatel sagedustel K ei muutu nulliks, vaid läheneb asümptootiliselt väärtusele 1. Seega väga madalatel sagedustel vastuvõturuupor heli ei võimenda.

4.

Mikrofonid

4.1 MIKROFON KUI NELIKLEMM

Mikrofoni ülesandeks on helirõhu muundamine sellega võrdeliseks vahelduvpingeks. Iga mikrofon sisaldab põhiliste koostisosadena mingi membraani või plaadikujulise pinna S, millele helirõhk mõjub jõuga F (joon. 4.1.*a*) ja mingi elektromehaanilise muunduri,



Joon. 4.1. Mikrofoni aseskeemid

mis muundab selle jõu vahelduvpingeks. Olgu võnkuva pinna mehaaniline takistus z_g; siis muunduri sisendkiirus

$$v = \frac{F}{z_g + z_{sis}}, \tag{4.1}$$

kus z_{sis} on generaatorirežiimis töötava muunduri sisendtakistus (vt. valem 3.31). Sellele vastav mikrofoni kui neliklemmi aseskeem on toodud joonisel 4.1.*b*. Teades muunduri parameetreid ja

koormustakistust R_k, on nüüd valemite 3.31 ja 3.33 põhjal arvutatav mikrofoni väljundpinge

$$U = FK_{gen} = vz_{sis}K_{gen}. \tag{4.2}$$

Jõud F sõltub nii helirõhust kui ka mikrofoni mõõtmetest ja konstruktsioonist.

4.2. HELIRÕHULE VÕI SELLE GRADIENDILE TUNDLIK MIKROFON

Mikrofoni tundlikkuseks nimetatakse mikrofoni väljundpinge U ja mikrofonile langeva helilaine helirõhu p_0 jagatist:

$$\varepsilon = \frac{U}{p_0}. \tag{4.3}$$

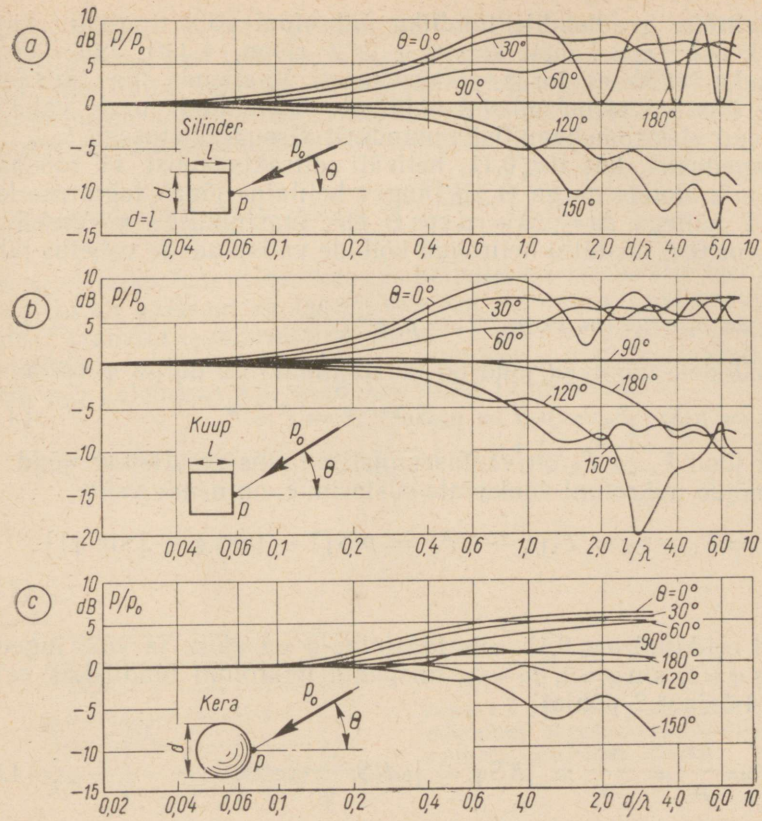
Mikrofoni kesta lõplike mõõtmete tõttu moonutub heliväli mikrofoni juures, mistõttu helirõhk p membraani vahetus läheduses ei pruugi võrduda moonutamata helivälja rõhuga p_0. Helirõhkude suhte p/p_0 sõltuvus mikrofoni kesta kujust ja mõõtmetest ning mikrofonile langeva helilaine suunast Θ ja helisagedusest on toodud joonisel 4.2. Näiteks sagedusel 10 kHz on lainepikkus õhus $\lambda \approx 3{,}5$ cm, mis vastab kasutatavamate mikrofonide läbimõõdule d. Seega sellel sagedusel $d/\lambda \approx 1$ ja kui mikrofon on suunatud heliallika poole ($\Theta = 0°$), siis membraanile mõjuv helirõhk on umbes 2 ... 3 korda suurem helirõhust vabas väljas. Sama mikrofoni tundlikkus poolviltu tagant saabuvale kõrgele helile ($\Theta = 150°$) on aga normaalsest 2 korda väiksem kesta varjestava mõju tõttu. Need nn. difraktsioonmoonutused vähenevad madalamatel sagedustel ja alates sagedusest, mispuhul $d/\lambda \approx 0{,}1$, ei erine membraanile mõjuv helirõhk praktiliselt helirõhust vabas väljas.

Mikrofonis elektromehaanilist muundurit käitav jõud F sõltub veel sellest, kas membraan on heliväljale avatud ühelt või mõlemalt poolt. Vastavalt sellele jaotatakse mikrofone kas tundlikeks helirõhule või selle gradiendile (muutumiskiirusele ruumis). Skemaatiliselt on need juhud kujutatud joonisel 4.3.

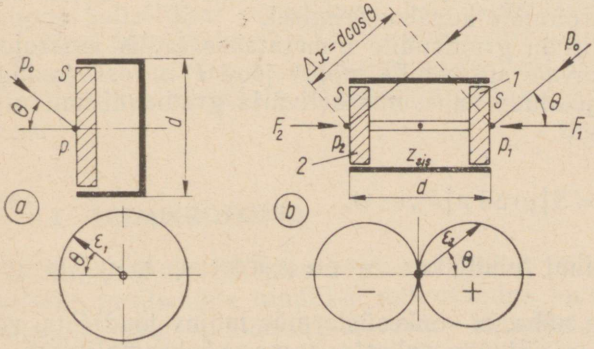
Helirõhule tundlikul mikrofonil (joon. 4.3.*a*) membraanile mõjuv jõud $F = pS$ ja mikrofoni tundlikkus valemite 4.3 ja 4.2 põhjal

$$\varepsilon_1 = \frac{U}{p_0} = K_{gen}S\frac{p}{p_0}. \tag{4.4}$$

Madalatel sagedustel ei sõltu mikrofoni tundlikkus helilaine saabumissuunast, s. t. mikrofoni suunakarakteristik on ringikujuline (joon. 4.3.*a*). Kõrgetel sagedustel on suunakarakteristik määratav joonise 4.2 abil.



Joon. 4.2. Helivälja moonutumine mikrofoni ees



Joon. 4.3. Helirõhule (*a*) ja selle gradiendile (*b*) tundlik mikrofon

Helirõhu gradiendile tundliku mikrofoni võib tinglikult kujutada koosnevana kahest kolvist *1* ja *2* (joon. 4.3.*b*), mis võivad võnkuda lühikeses torus pikkusega *d*. Vaatleme siin lihtsamat juhtu, kus kolvid on omavahel jäigalt ühendatud, ning vahetult käitavad elektromehaanilist muundurit sisendtakistusega z_{sis}.

Sagedustel, kus $d \leqslant 0{,}1\lambda$, heliväli difraktsioonist ei moonutu ning mikrofonile nurga Θ all langev helilaine jõuab tagumise kolvini *2* viitega $\Delta t = c\Delta x = cd\cos\Theta$ ehk faasinihkega $\varphi = 2\pi\Delta x/\lambda = \omega d\cos\Theta/c$, mistõttu helirõhud kolbide välispindade vahetus läheduses

$$p_1 = p_m e^{j\omega t}, \quad p_2 = p_1 e^{-j\varphi} = p_m e^{j\omega t} e^{-j\varphi}. \tag{4.5}$$

Ka kolbidele mõjuvad jõud on faasis nihutatud nurga φ võrra:

$$F_1 = p_1 S; \quad F_2 = p_2 S = p_m S e^{j(\omega t - \varphi)} = F_1 e^{-j\varphi}. \tag{4.6}$$

Et jõud F_1 ja F_2 on vastassuunalised, siis resulteeriv jõud F, mis mõjub mikrofoni võnkuvale süsteemile, on nende vahe:

$$F = F_1 - F_2 = F_1(1 - e^{-j\varphi}) = p_1 S[1 - (\cos\varphi - j\sin\varphi)]. \tag{4.7}$$

Et oli eeldatud $d \leqslant 0{,}1\lambda$, siis faasinihe φ on väike ja võib lugeda, et $\cos\varphi \approx 1$, $\sin\varphi \approx 0$, $p_1 \approx p_0$, mispuhul mikrofoni tundlikkus valemite 4.3 ja 4.2 põhjal

$$\varepsilon_2 = \frac{U}{p_0} = \frac{KF}{p_0} \approx jKS\varphi = j\omega KS\frac{d}{c}\cos\Theta. \tag{4.8}$$

Mikrofoni suunakarakteristik on kaheksakujuline, koosinusoidaalne (joon. 4.3.*b*). Küljelt saabuvale helile ($\Theta = 90°$) on mikrofon tundetu. Tuleb märkida, et tagasuunas saabuva heli puhul on mikrofoni väljundpinge faas 180° nihutatud. See asjaolu leiab kasutamist liitmikrofonide konstrueerimisel.

Tundlikuks helirõhu gradiendile nimetatakse taolisi mikrofone sellepärast, et liikuvale süsteemile mõjuv jõud F on esi- ja tagasuunas mõjuvate jõudude vahe, mis helivälja gradiendi kaudu on arvutatav järgmiselt

$$F = S\frac{dp}{dx}\Delta x = S|\operatorname{grad} p|d\cos\Theta, \tag{4.9}$$

mistõttu ka mikrofoni tundlikkus ε_2 on võrdeline helivälja gradiendiga.

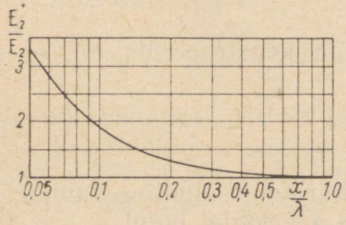
Valemist 4.8 on näha, et võnkesüsteemile mõjuv jõud F on võrdeline sagedusega ω. Et õhuosakeste sama võnkeamplituudi S_0 puhul nende võnkekiirus v_0 on samuti võrdeline sagedusega (valem 1.2), nimetatakse taolist mikrofoni veel kiirusele tundlikuks.

Kui taoline, helirõhu gradiendile tundlik mikrofon paikneb heliallika lähedal, kus heli levib keraväljana, tuleb arvestada, et helirõhu amplituud väheneb võrdeliselt kaugusega. Mikrofoni tagumisele membraanile *2* mõjuv helirõhk pole nüüd mitte ainult faasis nihutatud, vaid ka amplituudilt väiksem:

$$p_{2m} = p_{1m}\frac{x_1}{x_1 + \Delta x} \approx p_{1m}\left(1 - \frac{d\cos\Theta}{x_1}\right), \qquad (4.10)$$

kus x_1 — mikrofoni esiosa kaugus heliallikast (keravälja tsentrist). Seetõttu on väiksem ka tagumisele kolvile mõjuv vastassuunaline jõud F_2, mistõttu mikrofonile mõjuv resulteeriv jõud ja mikrofoni tundlikkus suurenevad. Asetades valemiga 4.10 määratud helirõhu p_{2m} valemisse 4.6, saadakse nüüd tundlikkuseks

$$\varepsilon_2' = \mathrm{j}\omega KS\frac{d}{c}\cos\Theta\left(1 - \mathrm{j}\frac{\lambda}{2\pi x_1}\right) = \varepsilon_2\left(1 - \mathrm{j}\frac{\lambda}{2\pi x_1}\right). \qquad (4.11)$$

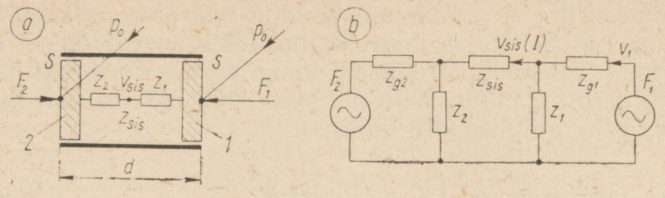


Joon. 4.4. Helirõhu gradiendile tundliku mikrofoni sageduskarakteristiku moonutumine heliallika lähedal

Tundlikkuse suhteline suurenemine on kujutatud joonisel 4.4, millest on näha, et tundlikkus hakkab suurenema, kui mikrofoni kaugus heliallikast on väiksem heli lainepikkusest. Näiteks helisagedusel 100 Hz, kus $\lambda = 3{,}4$ m, on kaugusel $x_1 = 0{,}1\lambda = 34$ cm tundlikkuse suurenemine umbes kahekordne. Seetõttu helirõhu gradiendile tundlikke mikrofone ei kasutata diktori- ja reporterimikrofonidena.

4.3. LIITMIKROFONID

Liitmikrofonil on kaks võnkuvat kolbi või membraani nagu helirõhu gradiendile tundlikul mikrofonilgi, kuid membraanid pole omavahel jäigalt sidestatud, vaid käitavad elektromehaanilist muundurit läbi mehaaniliste (või akustiliste) takistuste z_1 ja z_2 (joon. 4.5.*a*). Olgu kolbide *1* ja *2* mehaaniline takistus vastavalt z_{g1} ja z_{g2}, siis mikrofoni analoogskeem vastab joonisel 4.5.*b* toodule.



Joon. 4.5. Liitmikrofon (*a*) ja selle elektriline analoogskeem (*b*)

Elektromehaanilise muunduri sisendkiiruse v_{sis} elektriliseks analoogiks on siin vool I läbi takisti z_{sis} ja näiteks elektrotehnikas kasutataval kontuurvoolude meetodil on leitav, et

$$v_{sis} = \frac{z_1(z_2 + z_{g2})}{\Delta} F_1 - \frac{z_2(z_1 + z_{g1})}{\Delta} F_2, \tag{4.12}$$

kus

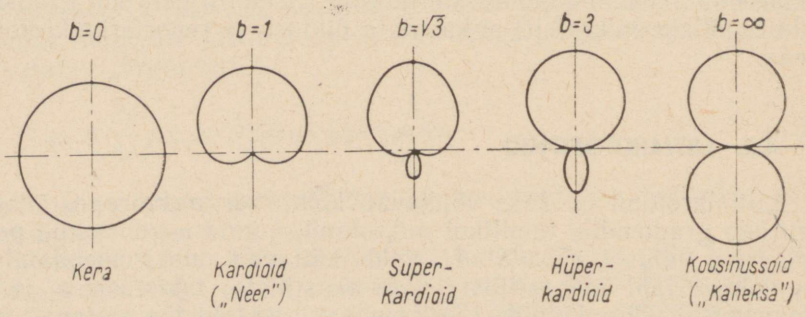
$$\Delta = (z_{g1} + z_1)(z_{g2} + z_2)(z_1 + z_{sis} + z_2) - (z_{g1} + z_1) z_2^2 - \\ - (z_{g2} + z_2) z_1^2$$

on skeemi determinant. Kui mikrofon konstrueerida nii, et suhe

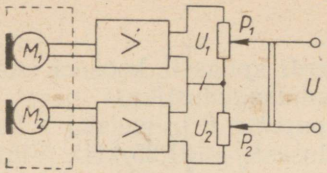
$$\frac{z_1(z_{g2} + z_2)}{z_2(z_{g1} + z_1)} = 1 + \mathrm{j}\frac{\omega d}{cb}, \tag{4.13}$$

kus b — positiivne reaalarv, siis mikrofoni suhteline suunakarakteristik saadakse valemite 4.6, 4.7 ja 4.8 põhjal kujul

$$\frac{\varepsilon(\Theta)}{\varepsilon(0)} = \frac{1 + b\cos\Theta}{1 + b}. \tag{4.14}$$



Joon. 4.6. Liitmikrofoni suunakarakteristikud



Joon. 4.7. Elektrilise liitmikrofoni skeem

Vastavalt b valitud väärtusele on taolise mikrofoniga võimalik saada kõiki praktiliselt vajalikke suunakarakteristikuid. Joonisel 4.6 on toodud neist iseloomulikumad ja kasutatavamad.

Peale taolise nn. *akustilise liitmikrofoni* leiavad kasutamist veel *elektrilised liitmikrofonid*, mis koosnevad kahest mikrofonist M_1 ja M_2 ühes kestas (joon. 4.7). Mikrofonide väljundpinged võimendatakse ja siis liidetakse sobivas vahekorras, mis on reguleeritav ühisvõlliga kaksikpotentsiomeetriga P_1P_2.

Olgu mikrofon M_1 tundlik helirõhule ja M_2 tundlik helirõhu gradiendile. Siis potentsiomeetri ülaasendis väljundpinge $U=U_1$ ja liitmikrofoni suunakarakteristik on ringikujuline. Regulaatori keskasendis väljundpinge

$$U=\frac{U_1}{2}+\frac{U_2}{2}=\frac{U_1+U_1\cos\Theta}{2}=U_1\frac{1+\cos\Theta}{2}. \qquad (4.15)$$

ja suunakarakteristikuks on kardioid ($b=1$, vt. joon. 4.6 ja valem 4.14). Regulaatori asendites, kus $U=0{,}37U_1+0{,}63U_2$ või $U=0{,}25U_1+0{,}75U_2$, saadakse vastavalt super- või hüperkardioid. Alumises äärmises asendis on karakteristikuks koosinusoid («kaheksa»).

Kui mikrofonid M_1 ja M_2 on kardioidkarakteristikuga, kuid suunatud üks ette, teine tahapoole, saadakse nende summana ringkarakteristik:

$$U=U_1\frac{1+\cos\Theta}{2}+U_1\frac{1-\cos\Theta}{2}=U_1. \qquad (4.16)$$

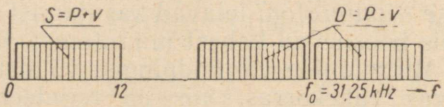
Kui M_2 lülitada vastandfaasiliselt, saadakse kaheksakujuline karakteristik:

$$U=U_1\frac{1+\cos\Theta}{2}-U_1\frac{1-\cos\Theta}{2}=U_1\cos\Theta. \qquad (4.17)$$

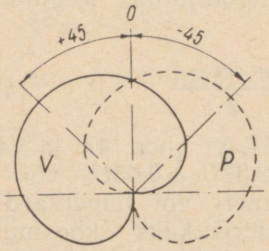
Kaksikkardioiddiagrammiga on liitmikrofonid МД-56 ja D-36.

4.4. STEREOMIKROFONID

Nõukogude Liidus kehtiva standardi kohaselt koosneb stereofoonilise saate spekter [70, 108] madalsageduslikust osast, nn. summa- e. *monosignaalist* S, mis on parema P ja vasaku V kanali summa ($S=P+V$), ja abikandesagedusest $f_0=31{,}25$ kHz. Viimane amplituud moduleeritakse parema ja vasaku kanali vahesignaaliga e. diferentssignaaliga $D=P-V$ (joon. 4.8). Vasakut ja paremat kanalit nimetatakse ka vastavalt A- ja B-kanaliks, ehk X- ja Y-kanaliks.



Joon. 4.8. Stereosignaali spekter



Joon. 4.9. Stereomikrofoni süsteemi *VP* (*AB*, *XY*) suunakarakteristikud

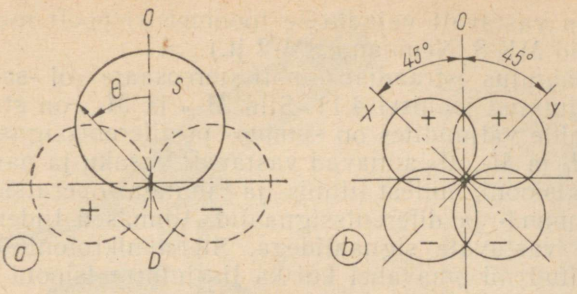
Tavaline stereofooniline liitmikrofon koosneb kahest kardioidkarakteristikuga mikrofonist, mis on teineteise suhtes pööratud 90° (joon. 4.9). Spektri madalsagedusliku osa e. summasignaali saamiseks liidetakse mõlema mikrofoni väljundpinged, millele vastab liitkarakteristik

$$P+V=1+\cos(\Theta+45°)+1+\cos(\Theta-45°)=$$
$$=2(1+\sqrt{2}\cos\Theta), \qquad (4.18)$$

mis sarnaneb kardioidile (joon. 4.10.*a*). Abikandesagedust moduleeriva diferentssignaali saamiseks liidetakse parema kanali väljundpingele vasaku kanali väljundpinge, mis on faasis pööratud 180°. Sellele vastab liitkarakteristik

$$P-V=1+\cos(\Theta+45°)-1-\cos(\Theta-45°)=$$
$$=2\sqrt{2}\cos(\Theta+90°), \qquad (4.19)$$

mis osutub 90° võrra pööratud koosinusoidiks (joon. 4.10.*a*).



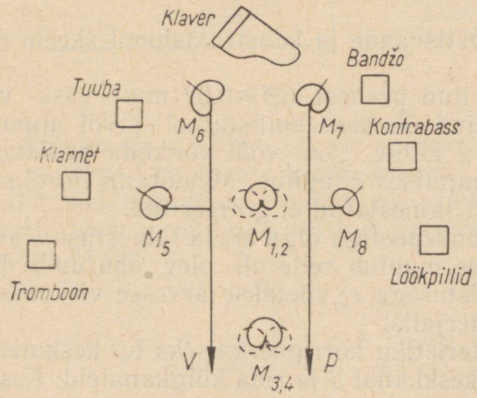
Joon. 4.10. Stereomikrofonide suunakarakteristikud: *a*— süsteem *SD* (*MS*), *b* — süsteem *XY*

Taolist tülikat liitmist ja lahutamist saab vältida, kui stereomikrofoniks kasutada kardioidkarakteristikuga mikrofoni ja koosinusoidkarakteristikuga mikrofoni, mis on teineteise suhtes pööratud 90° võrra (joon. 4.10.*a*). Kardioidkarakteristikuga mikrofon *S* annab siin kohe summasignaali ja helirõhu gradiendile tundlik mikrofoni *D* diferentssignaali abikandesageduse moduleerimiseks.

Süsteemi *SD* nimetatakse ka süsteemiks *MS* (*Mitte-Seite* — saksa k. keskmine-külgmine), sest stereosaate kuulamisel määrab kardioidmikrofon helipildi keskmise osa, kaheksakujulise karakteristikuga mikrofoni väljundpinge aga annab helipildile laiuse, ulatuse külgedele. Reguleerides «kaheksa» väljundpinge nulliks, «tõmbub» helipilt kokku monofoonseks punktiks.

Stereoefekti annavad ka kaks kaheksakujulise karakteristikuga mikrofoni, mis on orienteeritud heliallika suhtes 45° nurga all, nagu näidatud joonisel 4.10.*b* [101].

Toodetavad stereomikrofonid koosnevad tavaliselt kahest kondensaatormikrofonist, mis on teineteise suhtes pööratavad ja mille



Joon. 4.11. Mikrofonide paigutus stereosaate või -salvestuse korral

karakteristikud on vastavalt vajadusele toonmeistri poolt muudetavad (näit. tüübid MK-8, Neumann SM-2 jt.).

Mikrofonide paigutus estraadiansambli stereosaate või -salvestuse puhul on kujutatud joonisel 4.11. Siin $M_{1,2}$ ja $M_{3,4}$ on stereomikrofonid *SD*, mille väljundites on summa- ja diferentssignaalid. Mikrofonid M_5, M_6 ja M_7, M_8 annavad vastavalt vasaku ja parema kanali lisainformatsiooni, millest liitmis- ja lahutamisoperatsioonidega saadakse summa- ja diferentssignaalid. Viimased liidetakse stereomikrofonide vastavate signaalidega. Stereomikrofonid peavad olema faseeritud nii omavahel kui ka lisainformatsiooni andvate monomikrofonidega.

4.5. MIKROFONIDE KLASSIFIKATSIOON ELEKTROMEHAANILISE MUUNDURI JÄRGI

Vastavalt kasutatud elektromehaanilisele muundurile liigitatakse mikrofone elektrodünaamilisteks, elektrostaatilisteks, elektromagnetilisteks, piesoelektrilisteks jt.

Elektrodünaamilised mikrofonid jagunevad *võnkepooliga* e. *dünaamilisteks mikrofonideks*, kus membraani külge kinnitatud pool võngub radiaalses magnetväljas, ja *lintmikrofonideks*, kus volditud alumiiniumfooliumist lint võngub risti magnetväljaga.

Elektrostaatilistes e. *kondensaatormikrofonides* on üheks kondensaatoriplaadiks kullatud plastikaatkilest membraan, mis võngub paigalseisva aluse suhtes.

Vaid dünaamilised, lint- ja kondensaatormikrofonid tagavad kvaliteetse heliülekande, mistõttu on ringhäälingus ja televisioonis ainukasutatavad. Teised mikrofonitüübid — elektromagnetilised, piesoelektrilised, süsi- ning pooljuhtmikrofonid — leiavad kasutamist teenistuslikus sides ja ka raadioamatörismis.

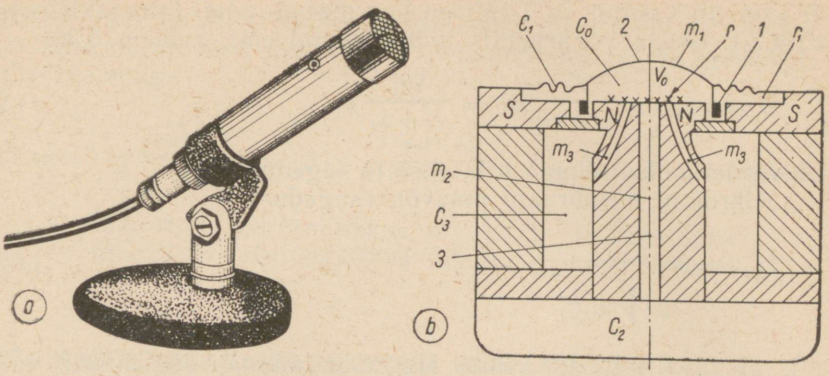
4.6. DÜNAAMILISED MIKROFONID

Dünaamilise mikrofoni välisvaade ja konstruktsiooni skeem on joonisel 4.12.

Siin on võnkepool *1* keritud peenest ($\varnothing \geqslant 0{,}02$ mm) vask- või alumiiniumtraadist ja liimitud õhukese polüstüroolist või alumiiniumfooliumist membraani *2* külge. Pool võib võnkuda püsimagneti poolusekingade rõngakujulises õhupilus. Membraan on elastsuse suurendamiseks äärtest lainestatud e. gofreeritud.

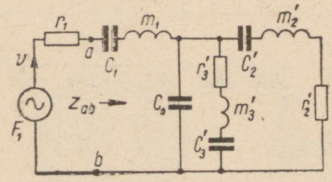
Membraani mass koos võnkepooliga olgu m_1 ja lainestuse elastsus C_1. Membraani võnkudes muutub selle all olev õhuruum V_0, mille elastsus olgu C_0. Takistusega r_1 võetakse arvesse viskoosset hõõrdumist membraani materjalis.

Mikrofoni sageduskarakteristiku korrigeerimiseks on keskmises poolusekingas — kärnis — keskkanal *3* ja rida külgkanaleid. Kesk-



Joon. 4.12. Mikrofoni МД-38 vaade (*a*) ja konstruktsioon (*b*)

kanal suubub magnetsüsteemitagusesse ruumi elastsusega C_2, mis koos keskkanalis paikneva õhumassiga m_2 moodustab Helmholtzi resonaatori. Analoogilise resonaatori moodustab ka külgavade õhumass m_3 magnetsüsteemi sisese ruumi õhumassiga, kusjuures nende elastsus on C_3. Kanalite avad ja membraan moodustavad akustilise trafo (vt. joon. 3.9.c), mille elektriliseks analoogiks on kolmemähiseline trafo (joon. 3.9.*d*). Pärast sekundaarkoormuste taandamist primaarpoolele (valem 3.22) saadakse mikrofonile joonisel 4.13 kujutatud elektriline analoogskeem. Takistuste r'_2 ja r'_3 suurendamiseks on kanalite avad kaetud kärni otspinnale liimitud õhukese siidtülliga.



Joon. 4.13. Mikrofoni МД-38 elektriline analoogskeem

Külgavade ristlõige on nii valitud, et taandatud suurused m'_2, C'_2 võrduvad vastavate võnkesüsteemi suurustega m_1, C_1. Seetõttu keskmistel sagedustel taolise süsteemi kui T-lüli sisendtakistus filtrite teooria põhjal ei sõltu sagedusest ja võrdub lüli lainetakistusega [132]:

$$z_{ab} = z_0 = \frac{1}{\sqrt{m_1 C_1}} \sqrt{1 + 2\frac{C_1}{C_0}} = \text{const.} \qquad (4.20)$$

(r'_2 on nii valitud, et T-lüli on koormatud oma lainetakistusega: $r'_2 = z_0$). Seega võnkepoolis indutseeritud emj. (valem 3.36)

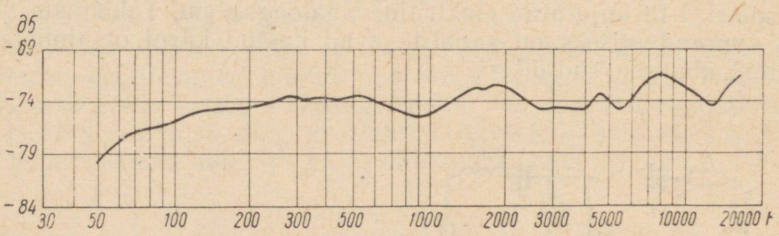
$$E = vz_{12} = \frac{F}{r_1 + z_0} Bl = \frac{SBl}{r_1 + z_0} p \qquad (4.21)$$

on võrdeline helirõhuga p ja ei sõltu sagedusest.

Mikrofoni membraani omavõnkesagedusest

$$f_{res\,1} = \frac{1}{2\pi \sqrt{m_1 C_1'}} \qquad (4.22)$$

mis on tavaliselt 300 ... 600 Hz, madalamatel sagedustel valem 4.20 enam ei kehti ja sisendtakistus hakkab suurenema, olles määratud põhiliselt elastsuste C_1 ja C_0 jadalülitusega. Korrigeerimiseks madalatel sagedustel kasutatakse keskkanaliga *3* Helmholtzi resonaatorit (lüli $r'_3 m'_3 C'_3$) omavõnkesagedusega 20 ... 30 Hz. Mikrofoni resulteeriv sageduskarakteristik nimikoormusel $R_N = 250\ \Omega$ on joonisel 4.14. On näha, et mikrofoni keskmine väljundnivoo on ca −75 dB, mis vastab tundlikkusele 0,092 mV/akbar. Karakteristiku ebaühtlus sagedusalas (50 ... 15000) Hz ei ületa ±4 dB.



Joon. 4.14. Mikrofoni МД-38 sageduskarakteristik

Mikrofoni suunakarakteristik on kuni sageduseni 1000 Hz praktiliselt ringikujuline, kuid kõrgematel sagedustel muutub üha teravamalt suunatuks nagu ühepoolsel kolbkiirgurilgi (joon. 3.24). Kirjeldatud konstruktsiooniga ja ringkarakteristikuga on näiteks dünaamilised mikrofonid МД-38 ja МД-59 [99].

Sobitamiseks välise koormustakistusega võib dünaamiline mikrofon sisaldada sobitustrafo. See on tavaliselt kujundatud autotrafona miniatuursel permalloisüdamikul. Sekundaarmähise väljavõtete abil on mikrofon sobitatav standardsete koormustakistustega 200 (250) ja 600 Ω.

Mikrofoni standardse väljundnivoo kohta tuleb märkida, et see määratakse nullnivoo 1 mW suhtes nimikoormusel R_N ja helirõhul 1 akbar valemiga

$$N_0 = 10 \lg \frac{\varepsilon_{0b}^2 \cdot 10^{-3}}{R_N} = 10 \lg \frac{(0{,}1\varepsilon_0)^2 \cdot 10^{-3}}{R_N} \text{ dB}, \qquad (4.23)$$

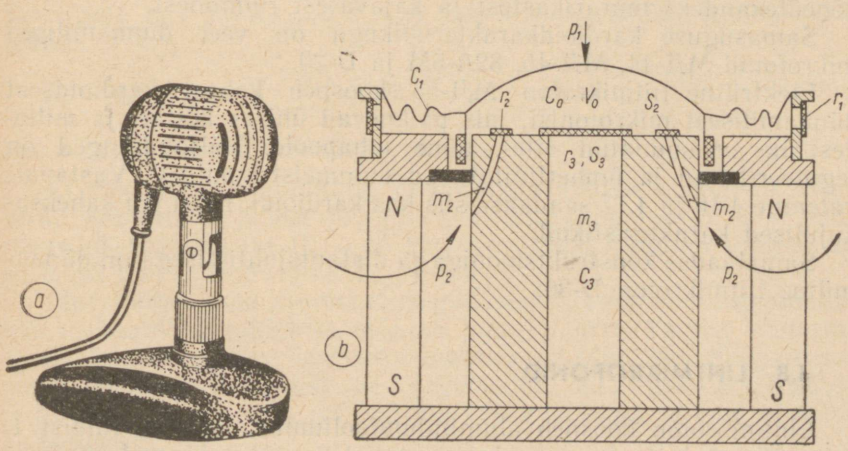
kus ε_{0b} — mikrofoni telgtundlikkus mV/akbar nimikoormusel;
ε_0 — mikrofoni telgtundlikkus mV/Pa (1 akbar = 0,1 Pa).

4.7. KARDIOIDKARAKTERISTIKUGA DÜNAAMILINE MIKROFON

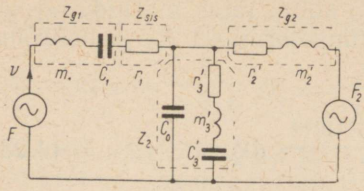
Mikrofoni välisvaade ja konstruktsiooni skeem on esitatud joonisel 4.15.

Kardioidkarakteristik saavutatakse siin seetõttu, et mikrofoni küljed on avatud, mistõttu ta on tundlik ka helirõhu gradiendile [19]. Muus osas on mikrofoni konstruktsioon ja tööpõhimõte samasugune kui joonisel 4.12 kujutatud mikrofonil.

Mikrofoni mehaanilisele aseskeemile (vt. joon. 3.13.*a*) vastab joonisel 3.13.*c* toodud elektriline analoogskeem kolmemähiselise trafoga, mille sekundaarmähiste koormuse taandamisel primaarpoolele saadakse joonisel 4.16 kujutatud skeem. Et skeem sarnaneb



Joon. 4.15. Kardioidkarakteristikuga dünaamilise mikrofoni МД-46 vaade (*a*) ja konstruktsioon (*b*)



Joon. 4.16. Mikrofoni МД-46 elektriline analoogskeem

joonisel 4.5 tooduga, kui viimases panna $z_1 = \infty$, siis valemi 4.12 põhjal membraani võnkekiirus

$$v = \frac{(z_{g2} + z_2)F_1 - z_2 F_2}{z_{sis}(z_{g2} + z_2) + z_{g2}z_2}. \tag{4.24}$$

Valemi 4.13 põhjal konstrueeritakse mikrofon nii, et suhe

$$\frac{z_{g2}}{z_2} = (\mathrm{j}\omega m_2 + r_2)\mathrm{j}\omega C_0 = \mathrm{j}\frac{\omega d}{cb}, \tag{4.25}$$

millest suunakarakteristiku parameeter

$$b \approx \frac{d}{cr_2C_0}. \tag{4.26}$$

Valides b sobiva väärtuse on nüüd võimalik saada kõiki joonisel 4.6 kujutatud karakteristikuid. Mikrofonil МД-46 on valitud $b \approx 1$, mistõttu saadaksegi kardioiditaoline suunakarakteristik. Korrigeeriva lüli $r'_1 m'_3 C'_3$ omavõnkesagedus on kõrgem kui МД-38 vastaval lülil (joon. 4.14), mistõttu korrigeerimine toimub umbes sagedusel 150 ... 250 Hz. Sellest madalamatel sagedustel on sageduskarakteristikul langus 15 ... 18 dB, mistõttu mikrofon on kohane kõneülekandeks mürarikastest ja kajavatest ruumidest.

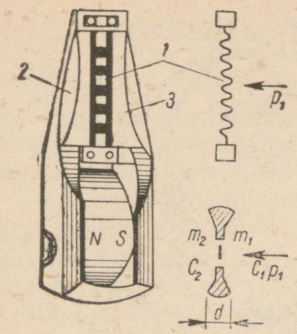
Samasuguse kardioidkarakteristikuga on veel dünaamilised mikrofonid МД-44, МД-45, 82A-5M ja D-20.

Elektriline liitmikrofon МД-56 koosneb kahest kardioidsest dünaamilisest mikrofonist, mis paiknevad ühises kestas, ja milledest üks on suunatud ette-, teine tahapoole. Väljundpinged on reguleeritavad ja ümberlülitatavad toonmeistri puldist. Vastavalt valemile 4.16 ja 4.17 saadakse siis kas kardioidi, ringi või kaheksakujulised karakteristikud.

Samalaadse konstruktsiooniga ja distantsjuhtimisega on dünaamiline liitmikrofon D-36.

4.8. LINTMIKROFONID

Lintmikrofon koosneb alumiiniumfooliumist volditud lindist *1*, mis võib võnkuda tugeva püsimagneti NS poolusekingade *2* ja *3* vahel risti magnetvooga (joon. 4.17). Peale selle paikneb mikrofoni kestas veel trafo, mis lindi madala väljundtakistuse sobitab



Joon. 4.17. Lintmikrofoni konstruktsioon

standardse koormustakistusega 250 või 600 Ω. Et lint on nii eest kui ka tagant helirõhule avatud, on mikrofon tundlik helirõhu gradiendile ja kaheksakujulise suunakarakteristikuga.

Mikrofoni tundlikkuse ja sageduskarakteristiku määramisel tuleb arvestada, et lint asub poolusekingade keskel sümmeetriliselt ning helirõhk käitab linti läbi viimase ees ja taga oleva õhuhulga, mille mass on m ja elastsus C. Seepärast on mikrofoni analoogskeemiks joonisel 4.5.*b* toodu, kus

$$z_{g1} = z_{g2} = \mathrm{j}\omega m; \quad z_1 = z_2 = 1 : (\mathrm{j}\omega C). \tag{4.27}$$

Lindi kui elektromehaanilise muunduri sisendtakistus z_{sis} koosneb lindi massist m_2, elastsusest C_2 ja mehaanilisest kaotakistusest r_2, kus on arvestatud ka elektrilise koormustakistuse mõju. Seega

$$z_{sis} = \mathrm{j}\omega m_2 + \frac{1}{\mathrm{j}\omega C_2} + r_2. \tag{4.28}$$

Tavaliselt $z_{g1} = z_{g2} \ll z_{sis} \ll z_1 = z_2$, mistõttu valemite 3.36 ja 4.8 põhjal

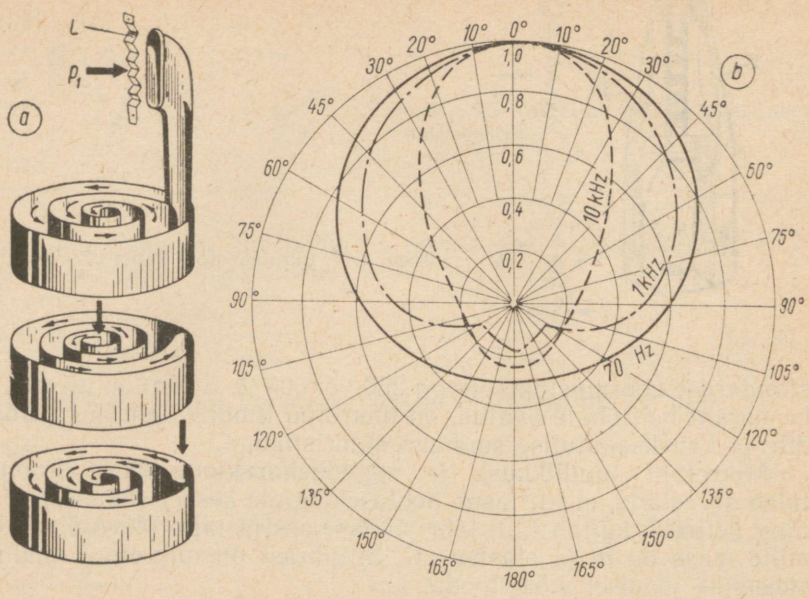
$$E = z_{12} v = Bl \frac{F_1 - F_2}{z_{sis}} = Bl \frac{p_1 S_1}{z_{sis}} \mathrm{j}\omega \frac{d}{c} \cos \Theta, \tag{4.29}$$

kus l ja S — lindi pikkus ja pindala.

Et mikrofoni väljundpinge ei sõltuks sagedusest, ongi lint volditud, mistõttu ta jäikus on väike (elastsus C on suur), nii et lindi omavõnkesagedus on 10 ... 15 Hz. Kasutatud fooliumi paksus on ca 0,002 mm ja lindi laius 2 ... 3 mm.

Lint töötab oma resonantsisagedusest kõrgematel sagedustel, kus mehaanilise takistuse määrab massi inerts. Taolist süsteemi nimetatakse seepärast inertseks ehk *massist tüürituks*. Seega resonantsisagedusest kõrgematel sagedustel, kus $\mathrm{j}\omega m_2 \gg 1/(\mathrm{j}\omega C_2)$, lindi takistus $z_2 \approx \mathrm{j}\omega m_2$ (on valitud veel $r_2 \ll \omega m_2$) ja emj. ei sõltu sagedusest:

$$E = \frac{Blp_1 S_1 d}{m_2 C} \cos \Theta. \tag{4.30}$$



Joon. 4.18. Kombineeritud lintmikrofoni labürint (*a*) ja karakteristik (*b*)

Taolise konstruktsiooni ja kaheksakujulise suunakarakteristikuga on näiteks lintmikrofonid МЛС-1 ja МЛ-16.

Kui takistada helirõhu juurdepääs lindi tagaküljele, saadakse ringikujulise suunakarakteristikuga helirõhule tundlik mikrofon. See võte on aluseks *kombineeritud lintmikrofoni* konstrueerimisel. Siin lindi ülaosa on tundlik helirõhu gradiendile, kuid alaosa pindalaga S on tagant tihedalt kaetud toruga, mille teine ots suubub heli neelavasse, hõreda siidvatiga täidetud spiraalsesse labürinti (joon. 4.18). Lindi alaosa on nüüd valemi 1.3 põhjal koormatud justkui lõpmatult pikk toru sisendtakistusega $z_{sis}=\varrho cS$. Viimane on valitud palju suurem lindi massi inertstakistusest, mistõttu määrab võnkekiiruse $v=F/z_{sis}=p_1\varrho c$. Sellist süsteemi, mille takistus on põhiliselt aktiivtakistus, nimetatakse *aktiivtakistusest tüürituks*. Olgu lindi alaosa pikkus l, siis indutseeruv emj. valemi 3.36 põhjal

$$E_p = z_{12}v = Blp_1\varrho c \qquad (4.31)$$

ei sõltu sagedusest ega helilaine saabumissuunast.

Liites üla- ja alaosas indutseeritud elektromotoorjõud, saadakse kardioidkarakteristikuga lintmikrofon. Nii on konstrueeritud näiteks kombineeritud lintmikrofon МЛ-17.

Kui vastava lülitiga ühendada mikrofoni väljundisse kas ainult üla- või alaosa, saadakse suunakarakteristikuks vastavalt kas «kaheksa» või ring.

4.9. KONDENSAATORMIKROFONID

Toodetakse nii helirõhule või selle gradiendile tundlikke kui ka kardioidkarakteristikuga kondensaatormikrofone. Oma helikvaliteedilt on kondensaatormikrofonid ületamatud, mistõttu neid rakendatakse ka mõõtemikrofonidena, etalonidena.

Kondensaatormikrofonis kasutatakse generaatorirežiimis elektrostaatilist muundurit, mille üks plaat laetakse läbi suure takistuse R alalispingeni U_0. See plaat saab võnkuda teise, paigalseisva plaadi suhtes (joon. 3.19), kusjuures tekkiv emj. $E_\sim$ arvutatakse valemiga 3.49. Et muunduris väljundi lühistamisel tekkiv lühisevool

$$I_{lüh} = E_\sim \mathrm{j}\omega C_0, \tag{4.32}$$

kus C_0 — muunduri plaatidevaheline mahtuvus, siis muunduri väljundtakistus

$$Z_{välj} = \frac{E_\sim}{I_{lüh}} = \frac{1}{\mathrm{j}\omega C_0}. \tag{4.33}$$

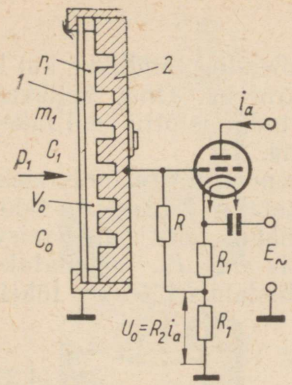
Nüüd on arvutatav koormatud muunduri väljundpinge

$$U_{välj} = \frac{Z_k}{Z_k + Z_{välj}} E_\sim = \frac{\mathrm{j}\omega C_0 R_k}{1 + \mathrm{j}\omega C_0 R_k} E_\sim, \tag{4.34}$$

kus $Z_k = R_k$ — muunduri koormustakistus, mis võrdub laadimistakistuse R ja võimendi sisendtakistuse rööpühenduse takistusega. On näha, et madalatel sagedustel väljundpinge väheneb. Valides piirsageduseks (kus sageduskarakteristik langeb 3 dB ehk $\sqrt{2}$ korda) sageduse 50 Hz, on muunduri mahtuvuse $C_0 = 100$ pF puhul vajalik $R_k = 30$ MΩ. Muunduri omamüra arvutatakse kui mürapinge takistist R_k, mis šunteeritud mahtuvusega C [137].

Valemist 4.34 selgub veel, et igasugune parasiitne, koormustakistust šunteeriv mahtuvus vähendab mikrofoni tundlikkust. Seepärast peab võimendi olema suure sisendtakistusega ja väikese sisendmahtuvusega. Võimendi tuleb paigutada muunduri vahetusse lähedusse — mikrofoni kesta. Viimane võte vähendab ühendusjuhtmete parasiitmahtuvuse miinimumini ning väldib välishäirete sissetungimist (pikk ühenduskaabel kõrgeoomilise koormusega on häiretele eriti tundlik).

Helirõhule tundliku kondensaatormikrofoni konstruktsioon on skemaatiliselt kujutatud joonisel 4.19. Siseküljelt kullatud plastikaatkilest (paksusega ca 10 ... 20 μm) membraani *1* mass olgu m_1 ja elastsus C_1. Membraani ja liikumatu massiivse aluse *2* vahelise õhuruumi V_0 elastsus olgu C_0. Siis mikrofoni elektriline analoogskeem sarnaneb joonisel 4.13 toodule, kus $C_2 = C_3 = 0$.



Joon. 4.19. Helirõhule tundlik kondensaatormikrofon

Membraani võnkekiirus on nüüd arvutatav valemi 4.1 põhjal järgmiselt:

$$v = \frac{F_1}{r_1 + \mathrm{j}\left(\omega m_1 - \dfrac{C_1 + C_0}{\omega C_1 C_0}\right)}, \tag{4.35}$$

ning mikrofoni emj. valemi 3.49 põhjal

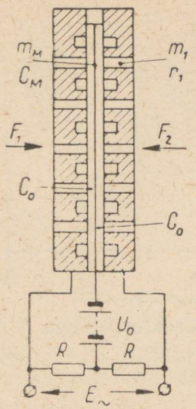
$$E_\sim = \frac{U_0}{\mathrm{j}\omega\delta} v = \frac{U_0 p_1 S_1}{\delta\left(\mathrm{j}\omega r_1 - \dfrac{C_1 + C_0}{C_1 C_0} - \omega^2 m_1\right)} \approx -\frac{U_0 S_1 C_1 C_0}{\delta(C_1 + C_0)} p_1. \tag{4.36}$$

Viimasest valemist on näha, et mikrofoni emj. ei sõltu sagedusest, kui töötatakse allpool omavõnkesagedust, kus

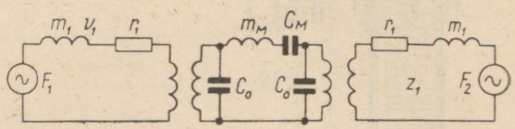
$$\frac{C_1 + C_0}{\omega C_1 C_0} \gg \omega m_1 \tag{4.36}$$

ja süsteemi mehaaniline takistus on määratud tema elastsusega. Taolist süsteemi nimetatakse seepärast elastseks ehk *elastsusest tüürituks*. Mikrofoni tundlikkuse suurendamiseks on suurendatud õhuruumi V_0 aukude puurimisega alusesse *2*, millega on õnnestunud elastsust C_0 suurendada kuni 10 korda ilma õhupilu δ suurendamata. Tavaliselt valitakse polarisatsioonipingeks $U_0 \approx 100$ V, mis on õhupilu $\delta \approx 20 \ldots 40$ μm läbilöögipingest 2 ... 3 korda madalam. U_0 suurendamine mikrofoni tundlikkust ei suurenda, sest siis tuleb suurema elektrostaatilise tõmbejõu tasakaalustamiseks suurendada membraani mehaanilist pinget, mis vähendab membraani elastsust C_1 ja ka mikrofoni tundlikkust.

Helirõhu gradiendile tundlik kondensaatormikrofon on skemaatiliselt kujutatud joonisel 4.20. Siin membraan massiga m_M ja elastsusega C_M paikneb õhupilus kahe augustatud massiivse plaadi



Joon. 4.20. Helirõhu gradiendile tundliku kondensaatormikrofoni konstruktsioon



Joon. 4.21. Helirõhu gradiendile tundliku kondensaatormikrofoni elektriline analoogskeem

vahel. Konstruktsioon on sümmeetriline ja selle elektriline analoogskeem on toodud joonisel 4.21, kus m_1 ja r_1 on aukudes oleva õhu mass ja viskoosne hõõrdetakistus ning C_0 — plaadi ja membraani vahelise õhuruumi elastsus. Valemi 4.12 põhjal saadakse siin membraani võnkekiiruseks

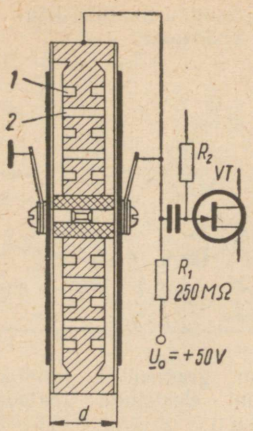
$$v = \frac{F_1 - F_2}{2(r_1 + j\omega m_1) + [\omega m_M - 1/(\omega C_M)]\,[j\omega C_0(r_1 + j\omega m_1) + 1]}. \tag{4.37}$$

Et mikrofoni sageduskarakteristik ei sõltuks sagedusest, peab ta töötama allpool membraani resonantsisagedust ning olema aktiivtakistusest tüüritud süsteem, kus $r_1 \gg \omega m_1$ ja $r_1 \gg 1/(\omega C_M)$. Siis valemi 3.49 ja 4.8 põhjal emj. väljundis

$$E_\sim = z_{12} v = \frac{U_0 d}{\delta c} \cdot \frac{2p_1 S_1}{r_1(2 + C_0/C_M)} \cos\Theta, \tag{4.38}$$

kus tegur 2 lugejas arvestab, et süsteem on diferentsiaalne, s. t. väljundpinge on kummalgi takistil R tekkiva pinge summa. Tänu süsteemi diferentsiaalsusele on membraanile mõjuv elektrostaatiline jõud null, sest tõmbejõud kummagi liikumatu plaadi poole on võrdsed ja vastassuunalised.

Kardioidkarakteristikuga kondensaatormikrofoni konstruktsioon on skemaatiliselt kujutatud joonisel 4.22. Kapslil on siin kaks membraani; üks ühel, teine teisel pool liikumatut elektroodi, millel on peale membraanialust õhuruumi V_0 suurendavate aukude *1* veel läbipuuritud augud *2* õhumassiga m ja hõõrdetakistusega r. Polarisatsioonipinge $U_0 = 50$ V (liikumatu elektroodi suhtes, mis on ühendatud võimendi sisendiga) antakse vaid ühele membraanile.



Joon. 4.22. Kardioidkarakteristikuga kondensaatormikrofon

Kapsli konstruktsioon on sümmeetriline ja elektriline analoogskeem sarnaneb joonisel 4.21 tooduga, kui seal m_M ja C_M asendada läbivate aukude parameetritega m ja r. Pingestatud membraani võnkekiirus v_1 on leitav elektriahelate teoorias kasutatavate meetoditega ning valemite 4.6, 4.7 ja 4.8 põhjal saab kuju

$$v_1 = \frac{F_1}{\mathrm{j}\left(\omega m_1 - \frac{1}{\omega C_1} - \frac{1}{\omega C_0}\right)} \times$$

$$\times \left(1 + \frac{d \cos \Theta}{C_0(r_2 + \mathrm{j}\omega m_2)\left[1 + \mathrm{j}\left(\omega m_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)\mathrm{j}\omega C_0\right]}\right). \qquad (4.39)$$

Et väljundpinge ei sõltuks sagedusest, tuleb töötada allpool membraani omavõnkesagedust, kus $\omega m_1 \ll 1/\omega C_1$, kusjuures tuleb rahuldada tingimus, et teguri $\cos \Theta$ kordaja oleks reaalarv:

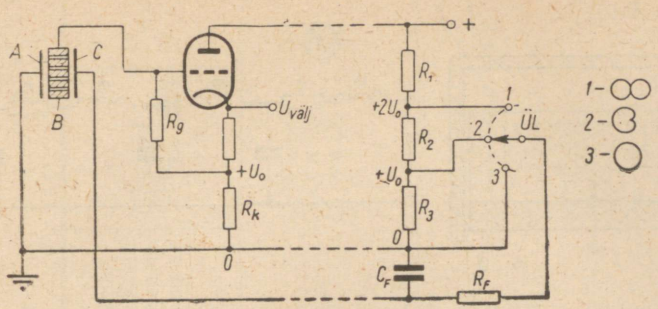
$$\frac{d}{C_0(r_2 + \mathrm{j}\omega m_2)\{1 - [\omega m_1 - 1/(\omega C_1)]\omega C_0\}} = b. \qquad (4.40)$$

Viimane tingimus on täidetud, kui $r_2 \gg \mathrm{j}\omega m_2$. Siis mikrofoni emj.

$$E_{\sim} = z_{12} v_1 = \frac{U_0}{\delta} \frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0} p_1 S_1 (1 + b \cos \Theta). \qquad (4.41)$$

Valides $b = 1$ saadaksegi joonisel 4.6 kujutatud kardioidne suunakarakteristik. Nii on konstrueeritud kondensaatormikrofonid 19A-1, 19A-9 ja 19A-13.

Kardioidkarakteristik saadakse ka ühemembraanilise konstruktsiooni puhul, kui membraani tagaküljele mõjub helirõhk p_2 läbi vastava akustilise süsteemi, nagu näiteks mikrofonil МД-46 (vt. joon. 4.16 ja 4.17). Kui sellise mikrofoni korpus varustada pööratava siibriga, millega on võimalik sulgeda külgavad, saab suuna-



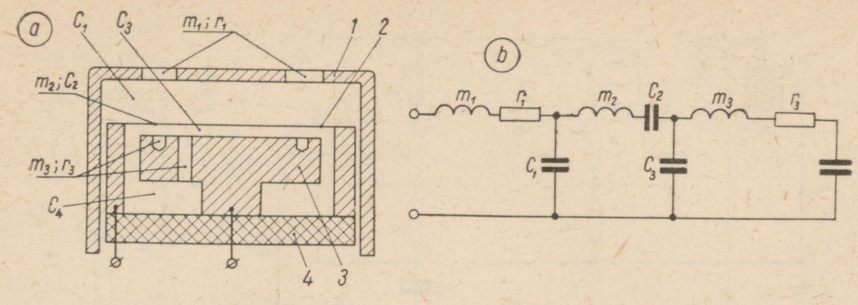
Joon. 4.23. Elektrilise distantsjuhtimisega kondensaatormikrofoni skeem

karakteristikut vajaduse korral muuta ringikujuliseks. Taolise, ümberlülitatava karakteristikuga «kardioid—ring» on kondensaatormikrofonid 19A-4 ja MK-61M.

Elektrilise distantsjuhtimisega kondensaatormikrofonis KM-55A (joon. 4.23) kasutatakse joonisel 4.22 kujutatud kahemembraanilist kapslit, millele on toonmeistri puldist lülitiga valitav kas kardioidi-, ringi- või kaheksakujuline suunakarakteristik. Kapsli paigalseisev elektrood *B* pingestatakse siin maandatud esimembraani *A* suhtes polarisatsioonipingega U_0 lambi katoodtakistilt R_k. Kui lüliti *L* asub keskasendis *2*, antakse niisama suur pinge U_0 ka tagamembraanile *C*, mistõttu viimane muutub elektriliselt passiivseks võnkesüsteemiks nagu mikrofonis 19A-1 ja saadakse kardioidkarakteristik. Lüliti asendis *3* tagamembraan *C* maandatakse; saadakse kaks kardioidkarakteristikuga mikrofoni, milledest üks on suunatud ette, teine tahapoole. Valemi 4.16 põhjal tekib nende kui kahe kardioidi summana ringkarakteristik. Kaheksakujuline karakteristik saadakse lüliti ülaasendis *1*. Siis tagamembraani pinge maa suhtes on $+2U_0$, liikumatu elektroodi *B* suhtes aga $2U-U_0=$ $=U_0$, mis on võrdne, kuid vastassuunaline esimembraani *A* pingele liikumatu elektroodi suhtes. Seetõttu on tagamembraani karakteristik kardioidne, kuid vastandfaasis ülaasendile *1* vastava karakteristiku suhtes. Valemi 4.17 põhjal saadaksegi nüüd mikrofoni suunakarakteristikuks vastandfaasiliste kardioidide summa, s. t. kaheksakujuline karakteristik.

Samasuguse distantsjuhtimisega on ka kondensaatormikrofon C-12.

Kondensaatormikrofonide uuemates tüüpides kasutatakse võimendi esimeses astmes elektronlambi asemel isoleeritud paisuga väljatransistori [100, 72, 71]. Viimasel on suur sisendtakistus ja väikesed omamürad. Toiteks vajab taoline kondensaatormikrofon vähem võimsust ja on seetõttu ökonoomsem ja ka väiksemate mõõtmetega.



Joon. 4.24. Mõõtemikrofoni MK-6 kapsli konstruktsioon (*a*) ja elektriline analoogskeem (*b*)

Mõõtemikrofon on helirõhu täppismõõtmiseks konstrueeritud, väikeste mittelineaar- ja sagedusmoonutustega kondensaatormikrofon, mida kasutatakse helirõhu täppismõõtmiseks. Kõrgematel sagedustel difraktsiooninähtusest paratamatult tekkiv sageduskarakteristiku tõus (mis joonis 4.2.*a* põhjal ulatub sagedusel, kus membraani läbimõõt võrdub lainepikkusele, 10 dB-ni) kompenseeritakse siin mikrofonikapsli vastava akustilis-mehaanilise konstruktsiooniga [78].

Mõõtemikrofoni MK-6 kapsli konstruktsioon ja elektriline analoogskeem on toodud joonisel 4.24, kus m_1, r_1 on kaitsevõre *1* avade õhumass ja takistus; m_2, C_2 — membraani *2* mass ja elastsus; m_3, r_3 — liikumatus elektroodis *3* asuvate avade õhumass ja takistus. Kapsli läbimõõdu $d = 15$ mm juures on sagedusalas 20 ... 40 000 Hz sageduskarakteristiku ebaühtlus 4 ... 6 dB. Mikrofoni temperatuuri- ja niiskusvea vähendamiseks on membraan nikkelfooliumist, paksusega 2,5 ... 3 μm. Suure koormustakistuse $R = 300$ MΩ ja kapsli väikese mahtuvuse $C = 14$ pF tõttu on mõõtemikrofoni MK-6 omamüra nivoo võrdlemisi suur: —35 dB.

4.10. KASUTATAVAMATE STUUDIOMIKROFONIDE ANDMEID

Koondülevaate saamiseks on tabelis 4.1 toodud kõrgekvaliteediliseks heliülekandeks ja -salvestuseks kasutatavate nn. stuudiomikrofonide olulisemad andmed [99]. Mikrofoni mass on antud ilma ühenduskaabli ja laua- või põrandastatiivita, kondensaatormikrofonidel ka ilma toiteseadmeta. Tuleb märkida, et kondensaatormikrofonide tundlikkus on tänu sisseehitatud võimendile ca 10 korda suurem kui teistel tüüpidel.

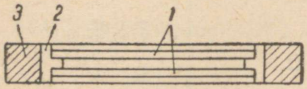
Tabel 4.1

Stuudiomikrofonide tehnilisi andmeid

Mikrofoni tüüp ja tähis	Sagedusala Hz	Sageduskarakteristiku ebaühtlus sagedusalas dB	Nimikoormus Ω	Väljundnivoo 1 mW suhtes nimikoormusel ja helirõhul 1 akbar dB	Telgtundlikkus nimikoormusel mV/Pa	Keskmine tundlikkuse vähenemine tagasuunas dB	Mõõtmed mm	Mass kg
Dünaamiline mikrofon								
МД-45	50 . . . 15 000	12	250	—78	0,63	12	∅ 37×115	0,3
МД-59	50 . . . 15 000	8	250	—78	0,63	0	∅ 34×120	0,6
82A-5M	50 . . . 10 000	10	250	—69	1,75	9—18	∅ 44×130	0,2
Lint-mikrofon								
МЛ-16	50 . . . 15 000	10	250	—78	0,63	0	∅ 54×225	1,5
МЛ-17	70 . . . 10 000	12	250	—76	0,8	12	∅ 55×293	1,7
Kondensaatormikrofon								
19A-4	50 . . . 12 000	10	250	—58	6,0	10—20	∅ 31×135	0,12
19A-9	40 . . . 15 000	8	37±10	—60,5	2,5	10	200×40×50	0,20
19A-13	30 . . . 15 000	6	220	—52	12,0	12—16	116×50×32	0,17
MK-61M	40 . . . 15 000	10	250	—56	7,5	15	∅ 31,5×100	0,24

4.11. PIESOELEKTRILISED MIKROFONID

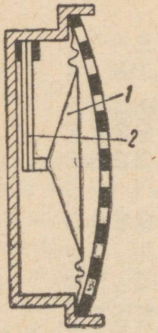
Lihtsaim piesoelektriline mikrofon (joon. 4.25) koosneb kahest bimorfsest elemendist *1* (vt. § 3.3), mis toetuvad elastsele vahetükile *2* ja on monteeritud plastmassraami *3*. Helirõhu mõjul elemendid töötavad paindele. Kuigi heliväljale avatud mõlemalt poolt, on mikrofon tundlik helirõhule, s. t. ringkarakteristikuga, sest elemendid pole mehaaniliselt sidestatud ja helirõhk mõjub kummagi välispinnale.



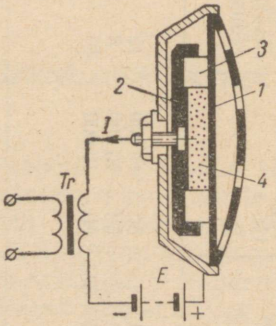
Joon. 4.25. Piesoelektriline element

Mahtuvuse suurendamiseks lülitatakse elemendid paralleelselt. Et bimorfse elemendi resonantsisagedus on kõrge, käitub mikrofon kui elastsusest tüüritud süsteem ja ühtlase sageduskarakteristiku saamiseks peab koormustakistus R olema palju suurem mikrofoni mahtuvuslikust väljundtakistusest. Tavaliselt $R=2\ldots3$ MΩ. Taolise nn. heliraku eeliseks on väikesed mõõtmed küllaldase tundlikkuse juures (ca 5 mV/Pa).

Ühe bimorfse elemendiga piesoelektrilised mikrofonid sisaldavad koonilise membraani *1* (joon. 4.26), mis käitab elemendi *2* kinnitamata otsa. Võnkesüsteemi resonantsisageduse määramisel tuleb siin arvestada ka membraani massi ja äärte lainestuse jäikust. Mikrofoni eeliseks on suur tundlikkus (ca 25 mV/Pa). Kuid suuremate mõõtmete tõttu on mikrofon kõrgematel helisagedustel suunatud karakteristikuga.



Joon. 4.26. Membraaniga piesomikrofon



Joon. 4.27. Süsimikrofon

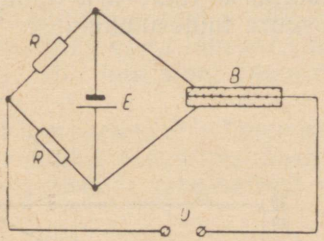
4.12. SÜSIMIKROFONID

Süsimikrofoni (joon. 4.27) membraani *1* ja tagumise süsielektroodi *2* vahel, viltrõngaga *3* piiratud kambris paikneb söepuru (graanulad) *4*. Helirõhu mõjul hakkab membraan võnkuma. Membraani muutlik surve söepurule põhjustab graanulatevaheliste puutekohtade takistuse muutumise ja pulseeriva voolu *I* mikrofoni vooluahelas. Trafo *Tr* asemel võib mikrofoni ühendada maandatud baaslülituses transistori emitteriga.

Süsimikrofonid oma suure tundlikkuse tõttu (ca 200 mV/Pa) on asendamatud telefonitehnikas, kus nende kvaliteedist piisab arusaadava kõne edasiandmiseks. Toodetakse süsimikrofone MK-10, mis on kujundatud vahetatavate kapslitena. Kapslid markeeritakse madal-, kesk- ja kõrgtakistuslikeks tähistega HO, CO ja BO vastavalt elektrilisele takistusele 30 ... 80 Ω, kuni 120 Ω ja kuni 210 Ω. Kapslite normaalsed töövoolud on vastavalt 60, 30 ja 20 mA (telefonisides vastab see aparaadi kaugusele keskjaamast 0,5; 4 või 10 km).

4.13. POOLJUHTMIKROFON

Siin kasutatakse nn. piesotakistuslikku nähtust, kus pooljuhtide (germaanium, räni) takistus muutub mehaanilise deformatsiooni mõjul. Mikrofoni põhisõlmeks on germaaniumist bimorfne element *B*, mis on ühendatud sildlülituse naaberõlgadesse (joon. 4.28).



Joon. 28. Pooljuhtmikrofoni skeem

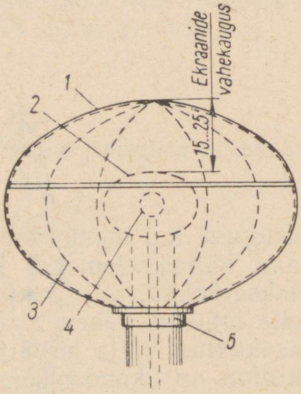
Elektroakustiline võnkesüsteem on samasugune kui membraaniga piesomikrofonil (vt. joon. 4.26). Membraan käitab elemendi kinnitamata otsa, elemendi üks plaat surutakse kokku, selle takistus suureneb, teises plaadis tekib tõmme, selle takistus väheneb. Alalispingega *E* toidetav sildlülitus läheb tasakaalust välja ja väljundis tekib vahelduvpinge *U*. Pooljuhtmikrofon on ökonoomsem ja helikvaliteedilt parem kui süsimikrofon, kuigi viimase tundlikkus on suurem.

4.14 MIKROFONI TUULE- JA VIHMAKAITSE [64]

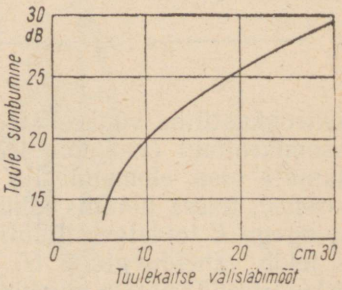
Kui mikrofonile puhub tuul, siis võib selle mõju mikrofonile märgata kolmel viisil: 1) heliülekandes on kuulda omapärast madalsageduslikku heli, mille tekitab tuule ebaühtlane surve mikrofoni membraanile; 2) mikrofoni enese ümber tekkivad tuulekeerised, mis ka on ülekandes kuuldavad; 3) nende kahe koosmõjul tekib interferentsheli, mis on samuti heliülekandes kuuldav.

Tuulest põhjustatud segava müra kõrvaldamiseks tuleb väljas, vabas õhus töötav mikrofon katta tuulekaitsega e. tuulevarjega (-ekraaniga). Viimane on kerakujuline traatvõre, millele on pingutatud õhuke kapron- või siidriie (joon. 4.29). Teooria ja akustilised mõõtmised [4] näitavad, et poorne riie avaldab tuulele, kus õhuosakeste liikumiskiirus on suur, palju suuremat takistust kui helilainele, kus õhuosakeste kiirus on märksa väiksem. Nimelt tõepoolest tuules kiirusega 36 km/h on õhuosakeste kiirus 10 m/s, kuid helilaines intensiivsusega 100 dB on õhuosakeste võnkekiirus valemite 1.3 ja 1.5 põhjal 0,477 cm/s. Kuna poorsete materjalide takistus õhuosakeste liikumisele on võrdeline osakeste kiirusega [7], avaldabki traatvõrele pingutatud siidriie tuulele palju suuremat takistust kui helilainele. Õhukese siidi takistus helile on tühine ja võrdub umbes 1 mm paksuse õhukihi takistusele, s. o. 41,8 kg/m^{2}s 1 [42].

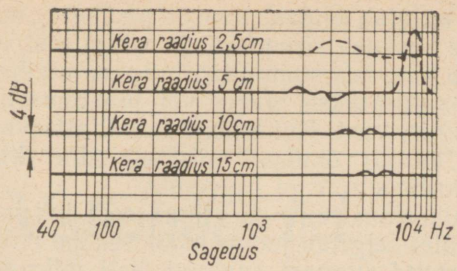
Tuule summutamine oleneb ka tuulevarje raadiusest. Joonisel 4.30 on toodud tuule sumbumise (dB) sõltuvus ühekihilise siidriidega kaetud kerakujulise tuulevarje läbimõõdust [4]. Graafikust nähtub, et mida suurem on tuulevarje läbimõõt, seda suurem on selle kaitsev mõju. Tavaliselt valmistatakse tuulevarje läbimõõduga 15 ... 30 cm, mis tagab küllalt suure tuulesumbumuse. Tao-



Joon. 4.29. Mikrofoni tuulevarje: *1* — välisekraan, *2* — siseekraan, *3* — traadist kandekonstruktsioon, *4* — mikrofon, *5* — kinnitusrõngas



Joon. 4.30. Tuule sumbumise sõltuvus tuulevarje välisläbimõõdust



Joon. 4.31. Sageduskarakteristiku sõltuvus tuulevarje raadiusest

lise, küllalt suure läbimõõduga tuulevarje praktiliselt ei moonuta mikrofoni sageduskarakteristikut (joon. 4.31).

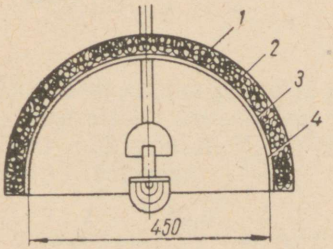
Tuulevarjet ei ole mõtet teha mitmekihilisest või paksemast riidest. Mõõtmised näitavad, et seejuures tuulesumbumuse suurenemine on tühine, kuid varje sageduskarakteristik halveneb tunduvalt, eelkõige kõrgetel helisagedustel (2 ... 15 kHz) [4].

Suure tuulesumbumuse annab kahekordne varje (vt. joon. 4.29). Siin on oluline, et varjed asuksid teineteisest igalt poolt võimalikult võrdsel kaugusel ja see kaugus oleks vähemalt 15 ... 25 mm. Siis resulteeriv sumbumus dB-des on kummagi ekraani sumbumuste summa.

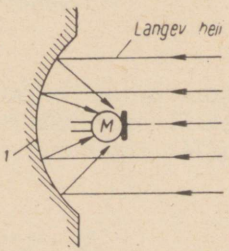
Kapron- või siidriide asemel võib varje traatvõre katta ka 5 ... 10 mm paksuse vahtpolüstürooliga või ka porolooniga, millest lõigatud segmendid omavahel kerakujulisele traatvõrele kokku liimitakse. Vahtpolüstürooli või porolooni mahukaal ei tohi ületada 30 ... 35 g/dm³.

Lisaks on vaja märkida, et tuulevarje on vajalik mitte ainult tuule summutamiseks, vaid ka sel juhul, kui kõneleja või solist asub mikrofonile väga lähedal (nõrga hääle korral või mürarikkas ruumis); siis mikrofoni tuulevarje summutab hingamisest tekitatud müra.

Vihmakaitse e. vihmavarje peab vältima sademete langemise mikrofonile, kusjuures peab olema välditud ka müra tekkimine vihmapiiskade langemisest vihmavarjele.



Joon. 4.32. Mikrofoni vihmavarje: *1* ja *4* — väline ja sisemine kandevõrk, *2* — vilt, *3* — niiskuskindel kile



Joon. 4.33. Paraboolreflektor *1* mikrofoniga *M*

Vihmavarje (joon. 4.32) kujutab endast avarat poolkera, mille all on varjul mikrofon. Varje koosneb sisemisest ja välimisest võrgust. Välimise võrgu all asub vilt, mis summutab langevate vihmapiiskade müra. Vildi alla paigutatakse õliriie või plastmasskile, mis kaitseb mikrofoni märgumise eest. Kui kasutada küllalt avarat tuulevarjet ($d = 450$ mm) ja küllalt õhukest niiskuskindlat kilet, siis vihmavarje mikrofoni parameetreid ei halvenda.

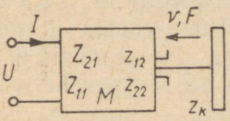
Mingil määral kaitseb mikrofoni tuule ja vihma eest ka paraboolreflektor, mille tööpõhimõtet selgitab joonis 4.33. Selline reflektor on mõeldud peamiselt teatud suunast saabuva heli mikrofoni juhtimiseks. Reflektor valmistatakse puidust või plastmassist, kuid tingimuseks on, et tema omaresonantsisagedus ei tohi langeda kuuldesageduse piiresse, s. t. ta ei tohi kaasa heliseda temale langeva heliga. Heli moonutavalt mõjuvad eeskätt «sügavad» paraboolreflektorid, kus õhuruumil parabooli sisemuses on resonantsisagedus kuuldesageduste spektris.

5.

Valjuhääldid

5.1. VALJUHÄÄLDI KUI NELIKLEMM

Valjuhääldi ülesandeks on elektrilise võimsuse (pinge) muundamine sellega võrdeliseks helienergiaks (helirõhuks). Iga valjuhääldi sisaldab mingi elektromehaanilise muunduri ja kiirguri (joon. 5.1). Olgu teada muunduri kui neliklemmi Z-parameetrid Z_{11}, Z_{21}, z_{12}, z_{22} (valem 3.25) ja kiirguri kui koormuse takistus z_M. See haaraku nii kiirguri konstruktsioonist põhjustatud mehaanilise takistuse kui ka kiirgustakistuse $z_k = r_k + jm_k$ (vt. § 3.3). Seos



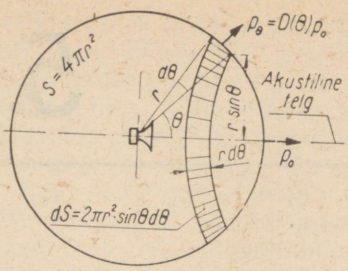
Joon. 5.1. Kiirguriga z_k koormatud elektromehaaniline muundur M

valjuhääldi klemmipinge U ja arendatava helirõhu p vahel leitakse siis järgmiselt. Arvestades, et koormatud muunduri ülekandetegur valemi 3.32 põhjal $K_{aj} = F/U$, saadakse muunduri väljundkiiruse efektiivväärtuseks

$$v = \frac{F}{z_M} = \frac{K_{aj}U}{z_M} = \frac{z_{12}}{Z_{11}(z_{22} + z_M) - z_{12}Z_{21}}\,U. \tag{5.1}$$

Kiirgav akustiline võimsus arvutatakse valemiga (3.55):

$$P_a = 0{,}5v_m^2 r_k = v^2 r_k. \tag{5.2}$$



Joon 5.2. Kiirgusvõimsuse arvutamine

Et seostada kiirguvat võimsust helirõhuga p, paigutatakse valjuhääldi mõtteliselt kerapinna keskpunkti (joon. 5.2) ning arvutatakse läbi kerapinna S väljakiirguv võimsus P_a.

Kui valjuhääldi kiirgab ühtlaselt kõigis suundades, nagu näiteks kolbkiirgur madalatel sagedustel (joon 3.24; $2R \leqslant 0{,}25\lambda$), siis helirõhk kerapinna igas punktis on ühesuurune ja võrdne helirõhuga p_0 akustilisel teljel, mispuhul kiirguv akustiline võimsus valemi 3.55 põhjal

$$P_{a0} = \frac{p_0^2}{\varrho c} S = \frac{p_0^2}{\varrho c} 4\pi r^2. \tag{5.3}$$

Valjuhääldi standardseks helirõhuks nimetatakse helirõhku p_0 akustilisel teljel 1 m kaugusel kiirgavast pinnast ja sisendvõimsusel 0,1 VA sagedusel 1000 Hz.

Kui valjuhääldi kiirgus on suunatud, nagu näiteks kolbkiirguril kõrgematel sagedustel (joon. 3.24; $2R > \lambda$), määratakse kiirguv akustiline võimsus integreerimise teel üle kerapinna S. Et valjuhäälditе heliväli on enamasti telgsümmeetriline, võetakse pinnaelemendiks rõngas laiusega $r\,d\Theta$ ja pindalaga $dS = 2\pi r^2 \sin\Theta\, d\Theta$. Olgu helirõhk rõnga pinnal p_Θ, siis läbi pinna dS kiirguv helivõimsus valemi 3.60 põhjal

$$dP_a = \frac{p_\Theta^2}{\varrho c} dS = \frac{p_0^2}{\varrho c} D^2(\Theta) 2\pi r^2 \sin\Theta\, d\Theta, \tag{5.4}$$

kus $D(\Theta) = p_0/p_\Theta$ — suunakarakteristiku tegur.

Integreerides valemit 5.4 üle kogu kerapinna $S = 4\pi r^2$ $(0 \leqslant \Theta \leqslant \pi)$, saadakse kogu kiirgusvõimsus

$$P_a = \frac{p_0^2}{\varrho c} 2\pi r^2 \int_0^\pi D^2(\Theta) \sin\Theta\, d\Theta = \frac{p_0^2}{\varrho c} \frac{S}{\Gamma}, \tag{5.5}$$

kus nn. telgkontsentratsioonitegur

$$\Gamma = \frac{2}{\int\limits_0^{\pi} D^2(\Theta) \sin\Theta \, d\Theta}. \tag{5.6}$$

Valemeist 5.5 ja 5.3 järeldub, et sama standardse helirõhu p_{0l} puhul akustilisel teljel kiirgusvõimsuste suhe

$$\frac{P_{a0}}{P} = \Gamma. \tag{5.7}$$

Seega telgkontsentratsioonitegur näitab, mitu korda on suunatult kiirgava valjuhääldi vajalik summaarne kiirgusvõimsus väiksem ühtlaselt kiirgava valjuhääldi omast, et tekitada akustilisel teljel sama helirõhku p_0. Lõpmatus ekraanis võnkuva kolbkiirguri kohta on Γ väärtused toodud joonisel 3.24 [105]. Sagedustel, kus $kR \geqslant 2$ ehk $2R/\lambda \geqslant 0{,}64$ suureneb taolise kolbkiirguri Γ võrdeliselt sageduse ruuduga:

$$\Gamma \sim (kR)^2 = 10(2\pi fR/c)^2 = \frac{400R^2f^2}{c^2}. \tag{5.8}$$

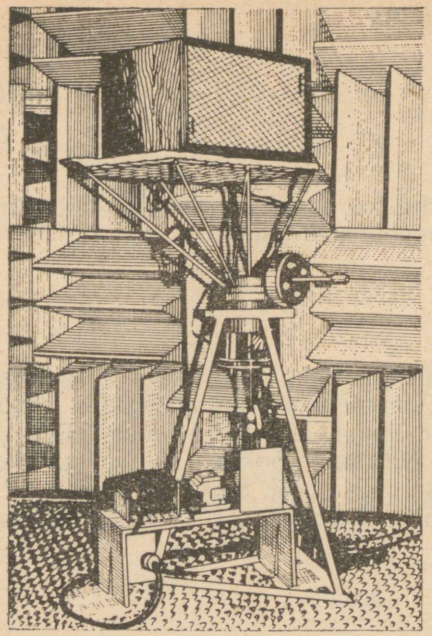
Valemite 5.1 ja 5.2 ning 5.5 põhjal on seos helirõhu p_0 ja klemmipinge U vahel järgmine:

$$p_0 = \sqrt{\frac{\varrho c P_a \Gamma}{S}} = v\sqrt{\frac{\varrho c \Gamma r_k}{4\pi r^2}} = \sqrt{\frac{\varrho c \Gamma}{\pi}} \frac{U\sqrt{r_k}}{2r\sqrt{|K_{aj} z_M|}}. \tag{5.9}$$

On näha, et helirõhk on pöördvõrdeline kaugusega r ja sõltub kiirguri ja muunduri omadustest (r_k, z_M, K_{aj}).

Kiirguriks kasutatakse tavaliselt mingit kolb- või ruuporkiirgurit (vt. § 3.4) ning muunduriks kas elektrodünaamilist, -magnetilist, -staatilist, magnetostriktsioonset või piesoelektrilist muundurit (vt. § 3.3). Vastavaid valjuhäälditüüpe analüüsitakse lähemalt järgnevas.

Valjuhääldi poolt arendatavat helirõhku mõõdetakse mõõtemikrofoniga (vt. § 4.9) erilises, nn. kajata ruumis, mille seinad lagi ja põrand on kaetud heli neelava materjaliga, näit. kiilukujuliste klaasvatist ribidega (joon. 5.3). Vastavalt standardile ГОСТ 7323-64 peab kajata ruum olema mõõtmetega vähemalt $5 \times 3 \times 2{,}3$ m; ruumi kvaliteeti kontrollitakse helirõhu nõrgenemise järgi, mis peab täpsusega ± 1 dB olema pöördvõrdeline kaugusega r. Mõõta võib ka vabas õhus, lähematest peegeldavatest pindadest (majasein jne.) vähemalt 5 m kaugusel, kusjuures valjuhääldi tuleb suunata vertikaalselt ülespoole.



Joon. 5.3. Valjuhääldi mõõtmine kajata ruumis

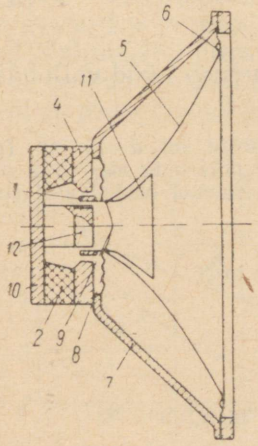
Valjuhääldeid võib mõõta ka ühtlase spektriga mürapinge abil tavalises ruumis mõõtmetega vähemalt 6×5×3 m. Sageduskarakteristiku mõõtmiseks kasutatakse siis ümberlülitatavat ribafiltrit ribalaiusega 1/3 oktaavi (nivool — 26 dB).

5.2. ELEKTRODÜNAAMILINE KOONUSVALJUHÄÄLDI

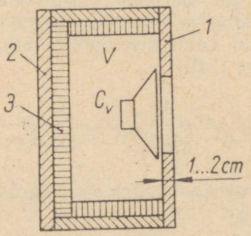
Konstruktsioon ja resonantsisagedus. Siin elektrodünaamiline muundur käitab kolbkiirgurit, millele konstruktiivsetel põhjustel on antud pabermassist valatud koonuse kuju. Valjuhääldi on skemaatiliselt kujutatud joonisel 5.4. Muunduri võnkepool *1* on keritud paberist alusele ja võib võnkuda püsimagneti *2* poolusekingade *4* õhupilu radiaalses magnetväljas. Võnkepool on liimitud koonuse *5* külge. Viimane on elastsuse suurendamiseks äärtest 6 lainestatud e. gofreeritud ning kinnitatud plekist stantsitud valjuhääldikorvi *7* külge. Võnkepool on tsentreeritud õhupilusse tsentreerimisseibiga *8*, mis elastsuse suurendamiseks on lainestatud. Õhupilu kaitseks tolmu ja rauapuru eest on koonuse tsentraalne ava kaetud kumera kübaraga *9*, mis on valmistatud õhukesest metallfooliumist. Ka servadest liimitud tsentreerimisseib *8* ja magnetsüsteemi tagumine äärik *10* kaitsevad õhupilu tolmu eest. Kõrgemate helisageduste paremaks ülekandeks on peakoonuse *5* tsentrisse liimitud väike nn. kõrgete helisageduste koonus *11*.

Rõngakujuline püsimagnet *2* valmistatakse tavaliselt baariumferriidist 2БА, mille magnetiline erienergia on $(1{,}6 \ldots 2{,}3) \cdot 10^4$ T · A/m [130]. Magneti tugeva puistevälja tõttu pole taoline valjuhääldi kasutatav televiisorites, magnetofonides ega magnetantenniga vastuvõtjates; seal tuleb kasutada nn. varjestatud kärnmagnetiga valjuhääldeid. Viimastes on püsimagnetiks suure magnetilise erienergiaga $3{,}2 \cdot 10^4$ T · A/m sulamist ЮНДК-24 valmistatud keskmine pooluseking — kärn — ja ääriku *10* ning rõnga *2* asemel on varjestav kapsel. Suurema magnetilise erienergia tõttu tuleb siin magnet kaalult mõnevõrra kergem (sama magnetilise induktsiooni *B* puhul õhupilus). Kärnmagnetiks kasutatakse veel sulamit ЮНДК-25БА, mille koostis (Ni, Al, Co, Cu, Fe) on küll sama mis sulamil ЮНДК-24, kuid on suunatult kristalliseeritud [130], mistõttu magnetiline erienergia on suurem $(5{,}3 \cdot 10^4$ T · A/m). Sulamist ЮНДК-25БА magnetiga valjuhääldid on kaalult veel kergemad ja suurema standardse helirõhuga.

Kõrgekvaliteediliste valjuhääldite koonused valatakse pabermassist, mis on sulfiittselluloosi ja puhta vati umbes võrdkaaluline segu.



Joon. 5.4. Koonusvaljuhääldi ristlõige

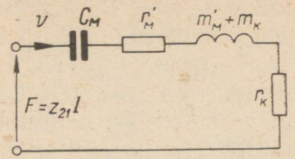


Joon. 5.5. Valjuhääldi kui ühepoolne kolbkiirgur

Elektrodünaamiliste valjuhääldite valmistamise tehnoloogiat käsitletakse detailsemalt kirjanduses [135].

Valjuhääldi monteeritakse tavaliselt 1 . . . 2 cm paksusest vineerist või liimitud puidust kõlalauale *1* (joon. 5.5), mis on esiseinaks tagant suletud kastile *2*. Valjuhääldi koonus töötab nüüd kui ühepoolne kolbkiirgur (joon. 3.23.*c*) kiirgustakistusega $z_{k3} = r_{k3} + j\omega m_{k3}$ (valem 3.62).

Olgu valjuhääldi võnkesüsteemi — koonuse ja võnkepooli — mass m'_M. Koonuse lainestatud ääre ja tsentreerimisseibi elastsus olgu C'_M ning viskoosne hõõrdetakistus r'_M. Need on valjuhääldi nn.



Joon. 5.6. Elektrodünaamilise valjuhääldi elektriline analoogskeem

omaparameetrid, millele liitub veel kiirgustakistus r_k ja suletud kasti puhul õhuhulga V elastsus C_v (valem 3.15). Kõik elemendid süsteemis on mehaaniliselt ühendatud paralleelselt e. sõlmena, millele valemi 3.5 põhjal vastab joonisel 5.6 toodud elektriline järjestikune analoogskeem, kus resulteerivad parameetrid avalduvad järgmiselt:
mass

$$m_M = m'_M + m_{k2}, \tag{5.10}$$

jäikus

$$\frac{1}{C_M} = \frac{1}{C'_M} + \frac{1}{C_v}. \tag{5.11}$$

Süsteemi elastsuse vähenemise tõttu suureneb nüüd valjuhääldi resonatsisagedus.

Olgu näiteks valjuhääldi, mille koonuse läbimõõt on $d=15$ cm (pind $S=0{,}25\pi d^2=188$ cm^2) ja omaelastsus $C'_M=3{,}5\cdot10^{-4}$ m/N ning $m_M=8$ g, monteeritud kasti sisemõõtmetega $0{,}6\times0{,}5\times0{,}4$ m. Kasti suletud õhuhulga elastsuse (valem 3.15)

$$C_v = \frac{V_0}{\gamma p_0 S^2} = \frac{0{,}12}{1{,}4\cdot1{,}01\cdot10^5\cdot0{,}0188^2} = 24\cdot10^{-4}\ \text{m/N}$$

tõttu väheneb süsteemi elastsus väärtuseni

$$C_M = \frac{C'_M C_v}{C'_M + C_v} = \frac{3{,}5\cdot24}{3{,}5+24}\cdot10^{-4} = 3{,}05\cdot10^{-4}\ \text{m/N},$$

mistõttu valjuhääldi resonantsisagedus

$$f'_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{m'_M C'_M}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{8\cdot10^{-3}\cdot3{,}5\cdot10^{-4}}} = 97\ \text{Hz}$$

suureneb väärtuseni

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{m_M C_M}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{8\cdot10^{-3}\cdot3{,}05\cdot10^{-4}}} = 102\ \text{Hz}.$$

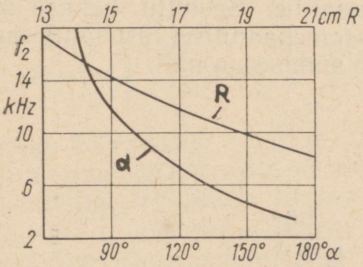
Näites ei ole arvestatud, et kastis töötades on mass m_M veidi väiksem, sest ühepoolsel kolbkiirguril $m_{k3}<m_{k2}$.

Valjuhääldi võnkesüsteemi mehaaniline takistus (valem 3.5)

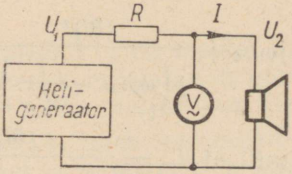
$$z_M = r_M + j\left(\omega m_M - \frac{1}{\omega C_M}\right)$$

sõltub sagedusest kui hüveteguriga $Q = \omega m_M / r_M$ jadavõnkeringi elektriline takistus. Tavaliselt on valjuhäälditel kui mehaanilistel võnkesüsteemidel hüvetegur resonantsisagedusel $Q = 10 \ldots 15$. Resonantsisagedusel f_{res}, kus $\omega m_M = 1/(\omega C_M)$, on mehaaniline takistus kõige väiksem ja võrdub aktiivtakistusele r_M. Takistuse z_M sõltuvus sagedusest $Q = 12{,}5$ puhul on toodud joonisel 5.10 logaritmilises teljestikus. Sagedusel f_1, kus koonuse läbimõõt d võrdub umbes poole lainepikkusega ($d = 17$ cm puhul $f_1 \approx 1$ kHz) lakkab koonus töötamast kui jäik kolb ning hakkab võnkuma kui hajuparameetritega süsteem. Koonus jaotub kontsentrilisteks rõngasteks, mis võnguvad vastandfaasis. Seejuures koonuse mehaaniline sisendtakistus z_M hakkab vähenema. Sageduse suurenedes koonuse võnkuv osa aheneb, sagedusel f_2 võngub veel vaid võnkepool ja selle lähem ümbrus.

Kõrgete sageduste heaks ülekandeks peab tsentraalses osas koonuse avanurk α ja moodustaja kõverusraadius R olema küllalt väikesed. Valjuhääldi ülemise piirsageduse f_2 sõltuvus nendest suurustest on toodud joonisel 5.7 [135]. Need sõltuvused on aluseks valjuhääldi koonuse projekteerimisel.

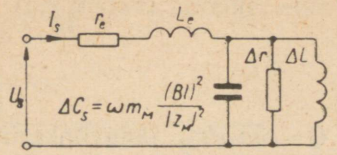


Joon. 5.7. Koonuse avanurga α ja kõverusraadiuse R sõltuvus ülemisest piirsagedusest f_2



Joon. 5.8. Valjuhääldi sisendtakistuse mõõtmine

Sisendtakistus. Küllalt palju informatsiooni valjuhääldi kohta võib saada, kui mõõta selle elektrilise sisendtakistuse sõltuvus sagedusest. Mõõdetakse nn. eeltakisti meetodil (joon. 5.8), kus valjuhääldit toidetakse heligeneraatorist läbi suure eeltakisti R konstantse vooluga $I = U_1/R$. Lampvoltmeetriga mõõdetakse pinge U_2 valjuhääldi võnkepoolil ja sisendtakistus arvutatakse valemiga $Z_{sis} = RU_2/U_1$. Sisendtakistuse sõltuvus sagedusest on toodud joonisel 5.10 logaritmilises teljestikus. Sisendtakistuse järsk suurene-



Joon. 5.9. Valjuhääldi sisendtakistuse aseskeem

mine resonantsisagedusel ja aeglane suurenemine alates sagedusest f_1 seletub järgmiselt. Valemite 3.30 ja 3.36 põhjal sisendtakistus ($z_{22}=0$, sest võnkepooli mass on lisatud koonuse massile)

$$Z_{sis} = Z_{11} + \frac{z_{12}z_{21}}{z_{22}+z_M} = r_e + j\omega L_e + \\ + \frac{(Bl)^2}{r_M + j[\omega m_M - 1/(\omega C_M)]}, \qquad (5.12)$$

kus $Z_{11}=r_e+j\omega L_e$ — pidurdatud võnkepooli elektriline takistus. Järjestikusele mehaanilisele takistusele z_M vastab siin elektriline rööpvõnkering (joon. 5.9). Resonantsisagedusel f_{res}, kus mehaaniline takistus $z_M=r_M$, on Z_{sis} maksimaalne. Resonantsisagedusest kõrgematel sagedustel on mehaaniline takistus inertse iseloomuga ($Z_M \approx j\omega m_M$), mistõttu elektrilisele poolele indutseeritud takistus $\Delta Z_{sis} \approx (Bl)^2/(j\omega m_M)$ on mahtuvusliku iseloomuga ning võnkepooli induktiivtakistusele $j\omega L_e$ vastassuunaline. Seetõttu hakkab Z_{sis} vähenema ja on minimaalne nn. elektromehaanilisel resonantsisagedusel f_3, kus mõlemate komponentide summa on null:

$$j\omega L_e + \frac{(Bl)^2}{j\left(\omega m_M - \frac{1}{\omega C_M}\right)} = 0,$$

$$\text{millest } L_e = \frac{(Bl)^2}{(2\pi f_3)^2 m_M - \frac{1}{C_M}} \approx \frac{(Bl)^2}{4\pi^2 f_3^2 m_M}.$$

Tavaliselt $f_3=250\ldots400$ Hz. Alates sagedusest f_1 (joon. 5.10), kus koonus hakkab tööle kui hajuparameetritega süsteem ja mehaaniline takistus z_M väheneb, suureneb elektriline sisendtakistus võrdeliselt ruutjuurega sagedusest, millele logaritmilises teljestikus vastab kaldsirge tõusuga 10 dB dekaadi kohta.

Sisendtakistuse resonantskarakteristikult saab määrata antud valjuhääldi mehaanilised parameetrid. Selle kohta järgmine näide.

Näide. Valjuhääldi sisendtakistuse mõõtmisel selgus, et resonantsisagedusel 98 Hz sisendtakistus $Z_{res}=68\ \Omega$ ja vähenes väärtuseni $Z_{res}/\sqrt{2}$ sagedustel 94 ja 102 Hz. Arvutada valjuhääldi mehaanilised parameetrid, kui võnkepooli takistus alalisvoolule $r_e=10\ \Omega$ ja $B=0{,}9$ T, $l=6{,}2$ m.

1. Valemi 5.12 põhjal resonantsisagedusel, kus $\omega L_e \ll r_e$,

$$r_M = \frac{(Bl)^2}{Z_{res} - r_e} = \frac{(0{,}9 \cdot 6{,}2)^2}{68 - 10} = 0{,}535 \text{ kgf/s}.$$

2. Võnkesüsteemi hüvetegur $Q_M \approx \frac{f_{res}}{\Delta f \frac{}{\sqrt{2}}} = \frac{98}{102 - 94} = 12{,}25;$

(lihtsustamiseks arvestatakse, et $r_e \ll Z_{res}$).

3. Võnkesüsteemi mass $m_M = \frac{Q_M r_M}{\omega_{res}} = \frac{12 \cdot 25 \cdot 0{,}535}{2\pi \cdot 98} = 0{,}01$ kg.

4. Võnkesüsteemi elastsus $C_M = \frac{1}{\omega_{res} r_m Q_M} =$

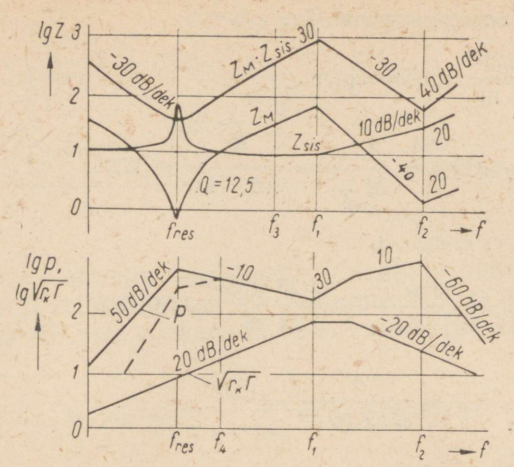
$$= \frac{1}{2\pi \cdot 98 \cdot 0{,}535 \cdot 12{,}25} = 2{,}48 \cdot 10^{-4} \text{ m/N}.$$

Valjuhääldi sisendtakistuse sõltuvust sagedusest kasutatakse nn. elektromehaanilise tagasisidestusega akustilistes süsteemides [117].

Sageduskarakteristik. Valjuhääldi sageduskarakteristikuks nimetatakse arendatava helirõhu sõltuvust sagedusest konstantsel toitepingel. Valemi 5.9 põhjal teljesihiline helirõhk

$$p_\theta = v \sqrt{\frac{\varrho c \Gamma r_k}{4\pi r^2}} = \frac{BlU}{2r} \sqrt{\frac{\varrho c}{\pi}} \frac{\sqrt{r_k \Gamma}}{|Z_e z_M|} \tag{5.13}$$

sõltub korrutistest $\sqrt{r_k \Gamma}$ ja $|Z_e z_M|$. Joonisel 5.10 on toodud Z_{sis} ja z_M ning nende korrutise sõltuvus sagedusest koos vastavate aproksimeerivate sirglõikude tõusudega logaritmilises teljestikus. Korrutise $\sqrt{r_k \Gamma}$ sagedussõltuvuse selgitamiseks tuleb meenutada, et madalatel sagedustel ($kR \leqslant 2$) ühepoolsel kolbkiirguril on kiirgustakistuse aktiivkomponent r_k valemi 3.61 põhjal võrdeline sageduse ruuduga, kuid telgkontsentratsiooni tegur $\Gamma = 1$. Seega korrutis $\sqrt{r_k \Gamma}$ suureneb võrdeliselt sagedusega, mis logaritmilises teljestikus vastab sirgele tõusuga 20 dB dekaadi kohta. Sagedustel, kus $kR > 2$, võib esimeses lähenduses lugeda r_k konstantseks, kuid valemi 5.8 põhjal Γ suureneb võrdeliselt sageduse ruuduga. Seega korrutis $\sqrt{r_k \Gamma}$ suureneb ka piirkonnas $kR > 2$ võrdeliselt sagedusega kuni sageduseni f_1, kus koonus hakkab tööle kui hajuparameetritega süsteem ja vastandfaasis võnkuvate kontsentriliste piirkondade tõttu hakkab koonuse kiirgustakistus vähenema. Teguri $\sqrt{r_k \Gamma}$ kulg sõltuvalt sagedusest on näidatud joonisel 5.10. Samal joonisel on näidatud ka valjuhääldi resulteeriv sageduskarakteristik p, mis

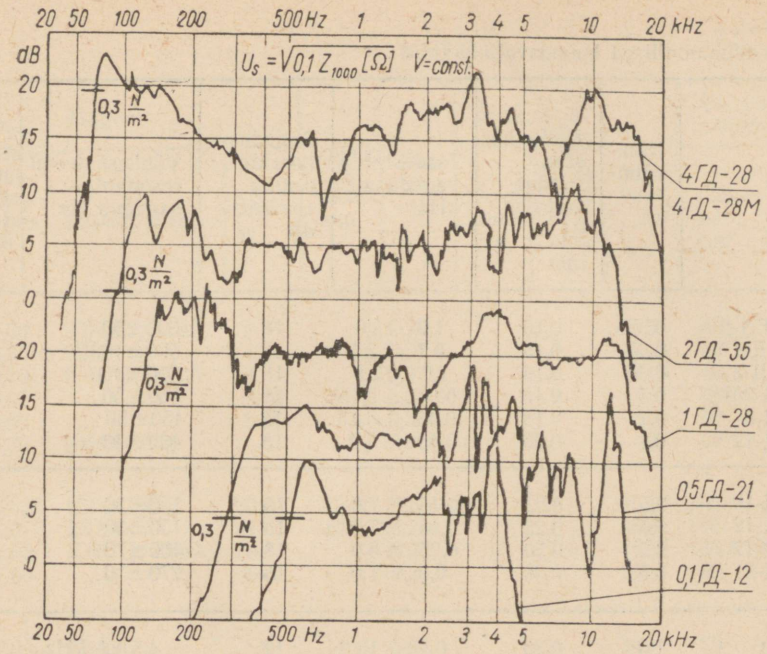


Joon. 5.10. Valjuhääldi sageduskarakteristiku konstrueerimine

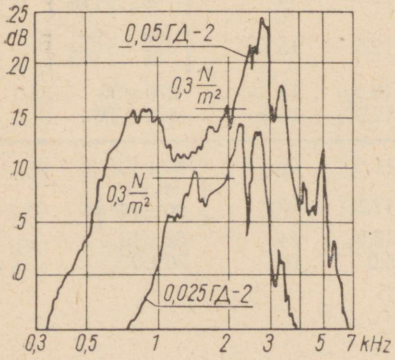
tänu logaritmilisele teljestikule saadakse teguri $z_M Z_{sis}$ karakteristiku lahutamisel teguri $\sqrt{r_k \Gamma}$ karakteristiku vastavatest ordinaatidest. On näha, et helirõhk langeb kiirelt sagedustel alla resonantssagedust f_{res} ja ülalpool sagedust f_2, kus koonuse töötav osa on ahenenud võnkepoolini. Kõrgete helisageduste koonuse *11* (vt. joon. 5.4) kasutamisel on ülemist sageduspiiri võimalik nihutada kuni sageduseni 12...15 kHz. Kõrgete sageduste ülekannet on võimalik mõnevõrra veelgi parandada, kui tsentraalse südamiku — kärni — otsa asetada vasest lühisrõngas *12* (joon. 5.4). Olles võnkepooli vahetus läheduses, on rõngas sellega elektriliselt küllaltki tugevalt sidestatud ja toimib kui lühiskeerd transformaatoril, vähendades võnkepooli induktiivsust L_e. Õhupilu liigse suurenemise vältimiseks valitakse rõnga paksus tavaliselt 0,25 mm, millest piisab induktiivsuse vähendamiseks 2 korda ja helirõhu suurendamiseks kõrgetel sagedustel 5...7 dB võrra.

Koonuse kui hajuparameetritega süsteemi paljude osaresonantside tõttu on reaalse valjuhääldi sageduskarakteristik väga sakiline. Mõnede toodetavate valjuhääldite eksperimentaalsed sageduskarakteristikud konstantsel sisendpingel on toodud joonistel 5.11 ja 5.12. Vastavalt normidele [125] on sisendpingeks pinge, millele sagedusel 1000 Hz vastab sisendvõimsus 0,1 VA. Võrdlemise hõlbustamiseks on siin sagedustelg ühine, kuid vertikaalsihis on karakteristikud üksteise suhtes nihutatud, kusjuures igale karakteristikule on märgitud reeperpunktina nivoo 0,3 N/m² (Pa) asukoht.

Levinumate valjuhääldite tehnilised andmed on toodud tabelis 5.



Joon. 5.11. Valjuhääldite sageduskarakteristikud



Joon. 5.12. Valjuhääldite sageduskarakteristikud

Elektrodünaamilised koonusvaljuhääldid

Tüüp	Nimivõimsus VA	Keskmine standardne helirõhk Pa	Taasestatav sagedusala kHz	Sagedus-karakteristiku ebaühtlus dB	Võnkesüsteemi resonantsisagedus Hz	Mitte-lineaarmoonutus grupp (vt. tabel 5.2)
0,025ГД-2	0,025	0,15	1,0 ... 3,0	18	500±50	В
0,05ГД-1	0,05	0,15	0,7 ... 2,5	18	600±100	В
0,05ГД-2	0,05	0,15	1,0 ... 2,5	18	600±100	В
0,1ГД-3М	0,1	0,18	0,63 ... 3,15	18	550±50	В
0,1ГД-9	0,1	0,18	0,45 ... 3,15	18	450±50	В
0,1ГД-12	0,1	0,20	0,45 ... 3,0	18	430±50	В
0,5ГД-10	0,5	0,23	0,15 ... 7,0	15	150±30	Б
0,5ГД-12	0,5	0,25	0,15 ... 7,0	15	150±30	Б
0,5ГД-17	0,5	0,30	0,25 ... 5,0	15	400±70	В
0,5ГД-21	0,5	0,30	0,3 ... 7,0	15	270±30	В
1ГД-3	1,0	0,30	0,5 ... 16,0	12	4,5±1 kHz	А
1ГД-18	1,0	0,18	0,1 ... 10,0	15	100±20 140±20	Б
1ГД-19	1,0	0,20	0,1 ... 10,0	15	100±20 140±20	Б
1ГД-28	1,0	0,20	0,1 ... 10,0	15	100±20 140±20	Б
1ГД-30	1,0	0,25	0,16 ... 5,0	15	140±10	В
2ГД-19М	2,0	0,20	0,08 ... 12,5	15	65 ... 90 85 ... 115	А
2ГД-35	2,0	0,20	0,08 ... 12,5	15	65 ... 90 85 ... 115	А
3ГД-15	3,0	0,25	1,0 ... 18,0	15	270±30	А
4ГД-7	4,0	0,20	0,06 ... 12,0	15	45 ... 70	А
4ГД-28	4,0	0,20	0,06 ... 12,0	15	80±10	А
4ГД-28М	4,0	0,25	0,06 ... 12,5	10	80±15 90±15	А
6ГДР-1	6,0	0,35	0,06 ... 16,0	14	65±10	А
6ГД-2	6,0	0,30	0,04 ... 5,0	10	30±5	А

Näivtakistus 1 kHz juures, Ω	Vootihedus õhupilus T	Magnet		Kärni läbimõõt mm	Õhupilu mm	Võnkepool		Mass g	Valjuhääldi mõõtmed	
		Sulami mark	Mass g			Keerdude arv	Traadi läbimõõt mm		Läbimõõt mm	Kõrgus mm
60	0,60	ЮНДК-25БА	3		0,37			16	40	16,5
60	0,60	2БА	4		0,37			12,2	40	16,5
6,3	0,70	ЮНДК-25БА	4		0,37			18,1	40	16,5
10	0,62	„	7,16	10	0,50			35	50	20
60	0,60	„	5,54		0,55			40	50	20
10	0,62	ЮНДК-24			0,50			40	60	21
6,5	0,65	ЮНДК-24	33,6	12	06,5			150	105	50
6,5	1,0	2БА	57	12	0,75			200	105	37
8	1,05	ЮНДК-25БА	29,8		0,5	57	0,07	150	106×70	37
8	1,05	„	29,8		0,5			180	80	37
12,5	1,0	2БА			0,65			200	70	27
6,5	0,65	ЮНДК-24	22	12	0,65	57	0,09	170	155×98	48
6,5	0,70	2БА	37	12	0,75	57	0,09	200	156×98	41
6,5	0,75	2БА	57	12	0,75	57	0,09	190	156×98	41
5,5	0,80	2БА	65						126	
4,5	0,70	2БА	57	12	0,75	47	0,11	250	152	52
4,5	0,75	2БА	63		0,80			256	152	52
4,5	0,85		40	12				230	105	64
4,5	0,70	ЮНДК-24	46	17	0,8	49	0,12	430	202	80
4,5	0,80	2БА	105	17	0,8	49	0,12	525	202	72
4,5	0,80	2БА	105	17	0,8	49	0,12	525	202	72
1,2	0,65	ЮНДК-24	92	25	0,9			500	222	96
8,0	0,95	2БА							252	106

Kasutegur. Valjuhääldi kasutegur kui kiirguva akustilise võimsuse ja elektrilise sisendvõimsuse suhe on väike, paremal juhul vaid mõni protsent. Kasutegur on arvutatav kas valemiga

$$\eta = \frac{\Delta r_k}{r_e + \Delta r'_M} = \frac{(Bl)^2 r_k}{r_e z^2_M + (Bl)^2 r'_M}, \qquad (5.14)$$

kus $\Delta r_k = (Bl)^2 r_k / z^2_M$, $\Delta r'_M = (Bl)^2 r'_M / z^2_M$ — vastavalt elektrilisele poolele indutseeritud kiirgustakistus r_k ja mehaaniline hõõrdetakistus r'_M, või eksperimentaalsetest andmetest, kui on teada standardne helirõhk p_{01} ning valjuhääldi elektriline sisendtakistus.

Näide. Arvutada valjuhääldi 2ГД-35 kasutegur, kui sagedusel 400 Hz sisendtakistus $Z_{sis} = R_e = 3{,}5\ \Omega$ ja standardne helirõhk joonise 5.11 põhjal $p_{01} = 0{,}475$ Pa sisendpingel

$$U_s = \sqrt{0{,}1 Z_{1000}} = \sqrt{0{,}1 \cdot 4{,}5} = 0{,}67 \text{ V}.$$

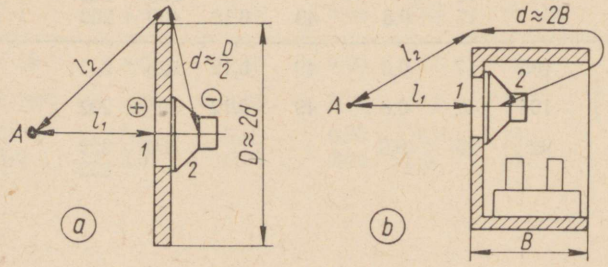
1. Kiirguv akustiline võimsus läbi kerapinna raadiusega $r = 1$ m (valem 5.3)

$$P_a = \frac{p_{01}^2}{\varrho c} 4\pi r^2 = \frac{0{,}475^2}{418} 4\pi \cdot 1 = 6{,}74 \cdot 10^{-3} \text{ W}.$$

2. Kasutegur $\eta = \frac{P_a}{P_e} = \frac{P_a R_e}{U_s^2} = \frac{6{,}74 \cdot 10^{-3} \cdot 3{,}5}{0{,}67^2} 100 = 0{,}53\%$.

Madal kasutegur on tingitud keskkonna (õhu) väikesest takistusest, mistõttu koonus võngub põhiliselt tühijooksus.

Valjuhääldi kõlalaual. Kui valjuhääldi on monteeritud lõplike mõõtmetega ekraanile — kõlalauale — (joon. 5.13.*a*) või tagant lahtisesse kasti (joon. 5.13.*b*), saab koonuse tagapinna *2* poolt kiiratud vastandfaasiline helilaine vabalt levida tagant ette, kus ta



Joon. 5.13. Valjuhääldi lõplike mõõtmetega kõlalaual (*a*) ja kastis (*b*)

nõrgendab esipinna *1* poolt kiiratud helilainet. Seetõttu resulteeriv helirõhk väheneb ja sageduskarakteristik madalatel sagedustel langeb. Taolise ebasoovitava nähtuse vältimiseks tuleb kõlalaua või kasti mõõde d valida suurem piirsageduse lainepikkuse kuuendikust. Näiteks $f=100$ Hz korral, mispuhul $\lambda=3{,}4$ m, olgu $d\geqslant 0{,}55$ m.

Arvutuslike seoste saamiseks vaadeldakse valjuhääldit kui kolbkiirgurit, mille esipind *1* põhjustagu kaugusel l_1 helirõhu $p_1=p_{1m}\sin(\omega t-kl_1)$. Tagapinna *2* poolt kiiratud heli jõuab punkti A pärast suurema teepikkuse l_2+d läbimist nõrgendatuna ja faasis nihutatuna: $p_2=-p_{1m}[l_1/(l_2+d)]\cdot\sin[\omega t-k(l_2+d)]$. Kui punkt A on küllalt kaugel ($l_1\gg d$), võib lugeda $l_2\approx l_1$ ja summaarne helirõhk $p=p_1+p_2=p_{1m}\sin(\omega t-kl_1)-p_{1m}\sin(\omega t-kl_1-kd)$. Pärast trigonomeetrilisi teisendusi saadakse:

$$p = p_{1m}2\sin 0{,}5kd\cdot\cos(\omega t-0{,}5kd) = \\ = p'_m\cos(\omega t-0{,}5kd). \qquad (5.15)$$

Viimasest valemist on näha, et sagedusel, kus

$$\sin 0{,}5kd = \sin\frac{\pi d}{\lambda p'_m} = 0{,}5 \quad \text{ehk} \quad d=\frac{\lambda}{6}, \qquad (5.16)$$

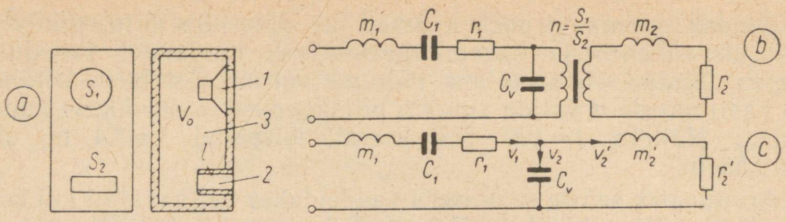
ei ole resulteeriv helirõhk veel vähenenud. Sellest madalamatel sagedustel võib asendada $\sin\alpha\approx\alpha$ ja

$$p'_m = p_{1m}2\sin 0{,}5kd \approx p_{1m}kd = \frac{\pi d}{c}f, \qquad (5.17)$$

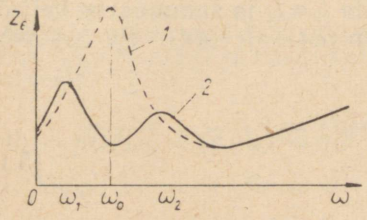
s. t. resulteeriv helirõhk muutub võrdeliselt sagedusega ning joonisel allpool piirsagedust $f_4=c/\lambda_4=cd/6$ tekib valjuhääldi logaritmilises sageduskarakteristikus lisalangus 20 dB/dek (näidatud kriipsjoonega joonisel 5.10).

Valjuhääldi asukoht ekraanil või tagant avatud kasti esiseinal on soovitav valida ebasümmeetriline. Siis tekib erinev käiguvahe d erinevates suundades ümber ekraani või kasti ja sageduskarakteristik ühtlustub. Et vältida heli levimist otse läbi ekraani või kasti seina, peab kasutatud materjal olema küllalt paks (vineer paksusega 1 cm või liimitud puit paksusega 2 ... 3 cm). Kõlalaud soovitatakse valmistada kuusepuidust selle heade kõlaliste omaduste tõttu.

Sageduskarakteristiku mõõtmiseks nii (kajata) ruumis kui ka vabas õhus kinnitatakse valjuhääldi küllalt suurele, nn. standardsele kõlalauale, mille mõõtmed on $1{,}65\times 1{,}35$ m, paksus 3 cm. Valjuhääldi telg on laua tsentrist nihutatud vastavalt 22,5 ja 15 cm võrra.



Joon. 5.14. Invertorkõlari konstruktsioon ja aseskeemid



Joon. 5.15. Valjuhääldi sisendtakistus kastita (*1*) ja invertorkõlaris (*2*)

Valjuhääldi invertorkõlaris.[1] Eespool selgus, et nii kinnine või ka tagant avatud kast kui ka lõplike mõõtmetega ekraan põhjustasid valjuhääldi sageduskarakteristikus lisalanguse madalatel sagedustel. Selle vältimiseks on otstarbekas kasutada kasti *3* (joon. 5.14) kahe avaga, milles ühes asub valjuhääldi *1*, teises avas *2* aga võnkuv õhumass $m_2 \approx \varrho S_2 l$. Kasti ruumala V_0 elastsus $C_v = V_0/(\gamma p_0 S)$ on häälestatud valjuhääldi resonantsisagedusele ω_0. Tänu sellele hakkab viimasest kõrgematel sagedustel õhumass m_2 avas S_2 — käitatuna elastsuse V_0 kaudu valjuhääldi koonuse tagapoole poolt — võnkuma koonusega vastandfaasis (koonuse liikudes kasti sissepoole, liigub õhumass m_2 avas S_2 sellele vastu, s. o. samuti sissepoole) ning kui kolb pindalaga S_2 kiirgama sünfaasselt valjuhääldi koonuse esipoolega. Seetõttu standardne helirõhk suureneb madalatel sagedustel 5 ... 6 dB võrra.

Kasti häälestatust valjuhääldi resonantsisagedusele ω_0 kontrollitakse sel teel, et mõõdetakse valjuhääldi elektrilise sisendtakistuse sõltuvust sagedusest (joon. 5.15). Karakteristikus 2 puudub nüüd sisendtakistuse järsk suurenemine sagedusel ω_0, sest valjuhääldi on koormatud invertorava S_2 kiirgus- ja hõõrdetakistuse summaga r_2. Kasti häälestatust saab reguleerida invertorava pikkusega l. Tavaliselt valitakse $S_2 \approx (0{,}25 \ldots 1) S_1$ [135, 9].

Invertorkõlari elektromehaanilise aseskeemi (joon. 5.14.*b*) koostamisel tuleb arvestada, et võnkuvad pinnad S_1 ja S_2 moodustavad akustilise trafo ülekandega $n = S_1/S_2$, nagu näidatud joonisel 3.9. Invertorava massi m_2 ja takistuse r_2 taandamisel primaar-

[1] Kõlar — akustiliselt kujundatud kast valjuhääldi(te)ga, akustiline agregaat.

poolele saadakse joonisel 5.14.*c* toodud aseskeem, kus võnkekiiruste $v_v = v_1 - v'_2$ ja v'_2 suhe on pöördvõrdeline vastavate harude takistustega:

$$\frac{v_v}{v'_2} = \frac{v_1 - v'_2}{v'_2} = \frac{v_1}{v'_2} - 1 = j\omega C_v (r'_2 + j\omega m'_2) =$$

$$= j\omega C_v r'_2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2}, \qquad (5.18)$$

kus $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m'_2 C_v}}$ — invertorkõlari resonantsisagedus.

Valemist 5.18 saadakse, et võnkekiiruste suhe

$$v_1/v'_2 = 1 - \omega^2/\omega_0^2 + j\omega C_v r'_2 \qquad (5.19)$$

ja faasinihe kiiruste vahel

$$\varphi_{12} = \operatorname{arctg} \frac{\omega C_v r'_2}{1 - \omega^2/\omega_0^2}. \qquad (5.20)$$

Valemist 5.20 tuleneb, et sagedustel, kus $\omega > \omega_0$, $\varphi_{12} \approx \pi$ ja õhumass m_2 invertoravas võngub vastandfaasis koonusega ($m_1 C_1 r_1$).

Invertorkõlari kasti seinad peavad olema küllalt jäigad, et madalatel sagedustel mitte kaasa resoneerida, mis moonutaks heliülekannet. Kast tuleb valmistada vähemalt 2 cm paksusest puitmaterjalist ja vajaduse korral tugevdada suuremaid pindu veel kaldtugedega [9].

Et kõrgematel sagedustel ei kujuneks kastis seisvaid laineid, mis suurendaksid sageduskarakteristiku ebaühtlust, kaetakse seinad seestpoolt poorse, heli neelava materjaliga. Neeldumisteguri suurendamiseks soovitatakse kattematerjali ja seina vahele jätta 1 . . . 2 cm laiune õhuvahe [135].

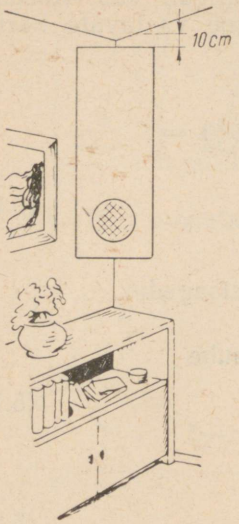
Kõlari paigutamisel toa nurka (joon. 5.16) võib invertoravaks olla laealune (või kasti ja põranda vaheline) pilu [30].

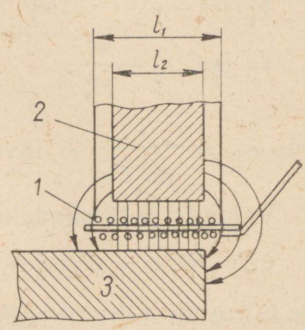
Mittelineaarmoonutus. Valjuhäältdi mittelineaarmoonutuse üheks põhjuseks on, et võnkepooli *1* pikkus l_1 on lähedane õhupilu pikkusele l_2 poolusekinga *2* ja kärni *3* vahel (joon. 5.17). Suure võnkeamplituudi puhul osa pooli keerde väljub õhupilust ja poolile mõjuv jõud $F = Bl$ väheneb. Tavaliselt tehakse pool veidi pikem õhupilust ($l_1 > l_2$), mis mõnevõrra vähendab mittelineaarmoonutust sama väljundvõimsuse juures.

Teiseks põhjuseks on koonuse ääre ja tsentreerimisseibi lainestuse elastsuse mittelineaarsus; suurtel võnkeamplituudidel elastsusjõud suureneb kiiremini kui paigutus x.

Mõlemad põhjused on paaritute harmooniliste tekitajateks, kuid kaitsevad võnkesüsteemi riknemise eest juhusliku ülekoormuse puhul (impulsshäired, toitmine suure võimsusega võimendist jne.).

Joon. 5.16. Nurgakõlar





Joon. 5.17. Mittelineaarmoonutuse selgituseks

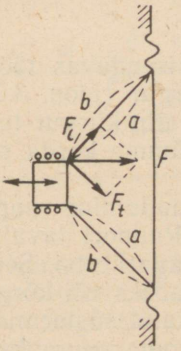
Mittelineaarmoonutus suureneb koos valjuhäälti sisendvõimsusega. Valjuhäälti nimivõimsuseks nimetatakse sisendvõimsust, mille juures mittelineaarmoonutus ei ületa maksimaalselt lubatavat väärtust. Vastavalt normidele (ГОСТ 9010—67) toodetakse elektrodünaamilisi valjuhääldeid järgmiste nimivõimsustega: 25, 50, 100 mW; 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4; 6 ja 8 W. Mittelineaarmoonutuse järgi on valjuhäälditid jaotatud kolme gruppi (tabel 5.2).

Tabel 5.2

Valjuhäälditе grupid

Valjuhäälditid	Nimivõimsus VA	Grupi tähis	Suurem lubatav mittelineaarmoonutus % sagedusel Hz										
			63	80	125	200	400	630	1000	2000	4000	6300	8000
Kõrgekvaliteedilised	1 . . . 8	A	20	15	10	5			3				
Kvaliteetsed väikesevõimsuslised (ja autoraadiotele)	0,1 . . . 1 (4 . . . 8)	Б			10	7	5			3			
Väikesegabariidilised	0,05 1	В						10	7	5			

Et teatud võnkekiiruse v ja helirõhu p_0 tekitamiseks vajalik võnkesüsteemi võnkeamplituud x on pöördvõrdeline sagedusega f, siis tekib suurem mittelineaarmoonutus just madalatel helisagedustel. Õnneks on kõrv mittelineaarmoonutusele madalamatel sagedustel vähem tundlik, mistõttu ka normid lubavad madalamatel sagedustel suuremat moonutust. Kui aga signaal sisaldab üheaegselt madalamatega ka kõrgemaid sagedusi, mille võnkeamplituud on väiksem, viib madalsageduslik komponent võnkesüsteemi tööle mittelineaarsesse ossa ning kõrgema sagedusega signaalist tekkiv helirõhk osutub moduleerituks madalama sageduse taktis. Siia lisandub veel kõrgema sagedusega signaali moonutumine Doppleri efektist [133]. Loetletud põhjustel kasutataksegi võimsamates heliülekandesüsteemides läbi eraldusfiltrite toidetavaid valjuhääldeid eraldi madalate ja kõrgete helisageduste taasestamiseks.



Joon. 5.18. Koonuse parameetriline võnkumine

Mittelineaarmoonutus tekib veel ka *koonuse parameetrilisest võnkumisest*. Võnkepooli liikumisel paremale (joon. 5.18) koonuse seinad jõu F pikikomponendi F_l mõjul nõtkuvad asendisse a. Võnkepooli liikumisel vasakule tekib koonuses tõmme ja moodustaja sirgeneb, aga järgmisel liikumisel paremale nõtkub sein asendisse b, olles inertsi mõjul läbinud keskasendi. Seega koonuse seinad võnguvad kaks korda madalamal sagedusel. Taolise parameetrilise subharmoonilise võnkumise kõrvaldamiseks kasutataksegi kõverjoonelise moodustajaga (nn. navi-)koonuseid, nagu näidatud joonisel 5.4. Ühtlasi tagatakse sellega ka kõrgemate sageduste parem ülekanne koonuse keskmiku suurema jäikuse tõttu.

Loomutruuks heliülekandeks on vaja, et peale väikeste sagedus- ja mittelineaarmoonutuste oleks väike ka valjuhääldi siirdeprotsessidest tingitud moonutus. Selleks peab valjuhääldi võnkesüsteemi mass olema võimalikult väike ja võimendi negatiivne tagasisidestus tugev ning väljundtakistus väike [25, 56]. Eriti väike on moonutus siirdeprotsessidest elektrostaatilistel ehk *kondensaa-*

torvaljuhäälditel nende membraani väikese massi tõttu [77, 56] ja *ioonvaljuhäälditel*, kus helilainete tekitajaks on ioniseeritud õhk. Ionisatsioon (nn. koroona ehk huumlahendus) tekitatakse siin varda otsas oleva plaatinakuulikese ümber, mis on kaetud erilise emiteeriva ainega ja toidetakse helisageduslikult amplituudmoduleeritud kõrgepingelise (10 ... 15 kV) kõrgsagedusvooluga (15 ... 30 MHz). Varras kuulikesega on paigutatud ruupori sisendavasse. Toodetavad tüübid töötavad sagedusalas 1 ... 20 kHz [5, 56, 81] ja on sobivad kõrgete helisageduste taasestamiseks, kuid keeruka konstruktsiooni tõttu pole laiemat kasutust leidnud.

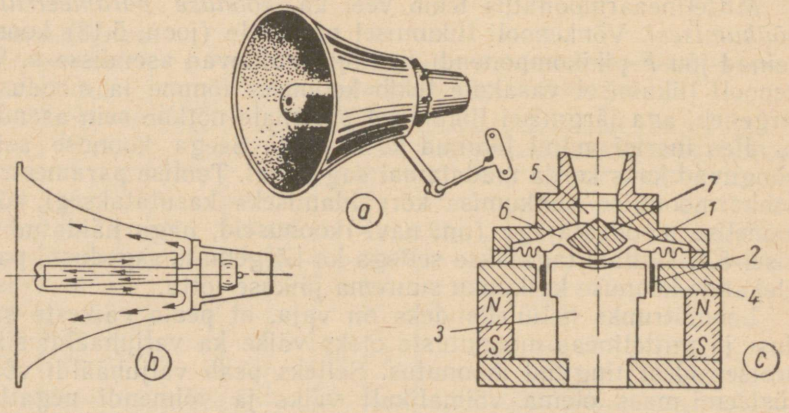
Elektromagnetilisi valjuhäälditeid tänapäeval nende madala helikvaliteedi tõttu ei kasutata.

Kõrgete helisageduste taasestamiseks kasutatakse võimsates helivõimendussüsteemides ruuporvaljuhäälditeid.

5.3. RUUPORVALJUHÄÄLDID

Ruuporvaljuhääldi koosneb ruuporist, mille sisendavas töötab elektrodünaamilisest muundurist käitatav kolbkiirgur (joon. 3.25). Tänu akustilise trafo kasutamisele (joon. 3.9) on siin kiirgur tugevalt koormatud, mistõttu kasutegur on umbes kümme korda suurem kui elektrodünaamilisel koonusvaljuhääldil.

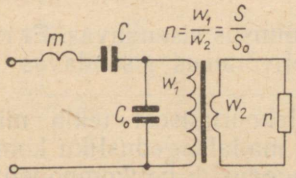
Ruuporvaljuhäälditе puuduseks on kiirguse puudumine ruupori kriitilisest sagedusest madalamatel sagedustel. Ruupori tavaliste mõõtmete puhul on kriitiliseks sageduseks mõnisada hertsi. Seega on ruuporvaljuhääldid kõlblikud vaid kõne ülekandeks või kõrgete helisageduste valjuhäälditeks võimsates heliülekandesüsteemides. Nendeks otstarveteks on nad aga asendamatud oma suure kasuteguri tõttu.



Joon. 5.19. Ruuporvaljuhääldi 10ГРД-5 välisvaade (*a*), ristlõige (*b*) ja helipea (*c*)

Tüüpilise ruuporvaljuhääldi 10ГРД-5 välisvaade, ristlõige ja helipea on kujutatud joonisel 5.19. Kiirguriks on siin helipeas (joon. 5.19.*c*) asuv alumiiniumist diafragma *1*, mida käitab võnkepool *2*, võnkudes magnetsüsteemi kärni *3* ja esiääriku *4* vahelises õhupilus. Diafragma *1* ja ruupori sisendava *5* vahel asub nn. ruuporieelne kamber *6*, millesse on asetatud täitetükk *7*. Viimase ülesandeks on kambri ruumala V_0 vähendamine ja diafragma erinevatest punktidest ruupori sisendavasse levivate helilainete faaside ühtlustamine.

Olgu diafragma ja sisendava pindalad vastavalt S ja S_0, siis kujuneva akustilise trafo ülekanne on $n=S:S_0$ ning valjuhääldi elektriline analoogskeem vastab joonisel 5.20 toodule. Diafragma mass ja elastsus on siin vastavalt m ja C. C_0 on ruuporieelse kambri õhuruumala elastsus ning $r=\varrho cS_0$ — ruupori sisendtakistus.



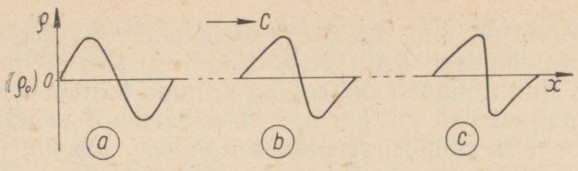
Joon. 5.20. Ruuporvaljuhääldi elektriline analoogskeem

Kõrgetel sagedustel mahtuvuse C_0 šunteeriv mõju suureneb ja trafo sisend lühistatakse. See määrab valjuhääldi ülemise piirsageduse. Sageduskarakteristiku alumiseks piirsageduseks on ruupori kriitiline sagedus f_{kr} (valem 3.65). Valjuhääldi mõõtmete vähendamiseks on ruupor kujundatud nn. murtuna, kolmekäigulisena (joon. 5.19.*b*).

Et ruuporvaljuhääldi membraan on koormatud suure akustilise takistusega $r'=n^2r$, on membraani võnkeamplituud väike, võrreldes samavõimsuseliste elektrodünaamiliste koonusvaljuhääldajatega, ja mittelineaarmoonutus magnetvoo ebaühtlusest õhupilus ning membraani elastsuse mittelineaarsusest on väikesed. Seevastu on siin määravaks ruupori sisendosa ja ruuporieelse kambri akustilisest ülekoormusest põhjustatud mittelineaarmoonutus. Nimelt õhu kui reaalse gaasi mittelineaarsusest tingitult (valem 3.14) on võnkeprotsessi levimiskiirus [133]

$$c=\sqrt{\frac{dp}{d\varrho}}=c_0\left(\frac{\varrho}{\varrho_0}\right)^{\frac{\varkappa-1}{2}}=c_0+\frac{\varkappa-1}{2}v \qquad (5.21)$$

suurem helilaine tihendustes, kus $\varrho>\varrho_0$, ja väiksem hõrendustes, kus $\varrho<\rho_0$. Seetõttu ruupori kitsas sisendosas leviv siinuseline helilaine moonutub lööklaineliseks, nagu näidatud joonisel 5.21. Tekki-



Joon. 5.21. Siinuselise helilaine moonutumine ruupori sisendosas

nud teise harmoonilise suhteline sisaldus arvutatakse valemiga [133]

$$\nu_2 = \frac{1}{4}\frac{\varkappa+1}{\varkappa p_0}\frac{\omega}{\omega_{kr}} p_{m1} = 1{,}23\cdot 10^{-2}\frac{\omega}{\omega_{kr}}\sqrt{\frac{P_a}{S_0}}, \qquad (5.22)$$

kus p_{m1} ja P_a on vastavalt helirõhk ja -võimsus sisendavas. Et moonutused poleks märgatavad, ei tohi helivõimsus sisendavas ületada 1 W/cm^2.

Ruuporieelse kambri akustilisest ülekoormusest tekib mittelineaarmoonutus, kui üheaegselt võimsa madalsagedusliku komponendiga Ω taasestatakse nõrgem kõrgsageduslik helikomponent ω. Nimelt muutub siin kambri ruumala siinuseliselt madalsageduse Ω taktis

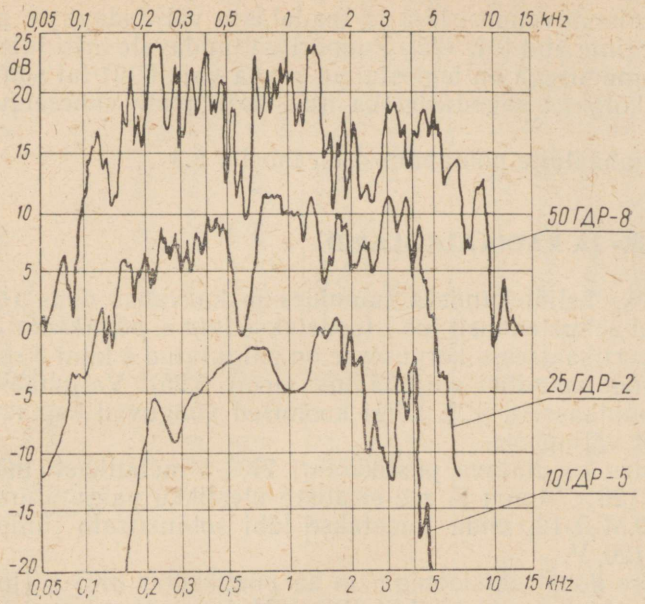
$$V = V_0 + V_m \sin \Omega t,$$

kus $V_m = Sx_m$ (x_m — diafragma S võnkeamplituud). Ruumala muutudes muutub ka selle akustiline elastsus

$$C_0 = \frac{V_0}{\varkappa p_0 S^2} + \frac{x_m}{\varkappa p_0 S}\sin \Omega t, \qquad (5.23)$$

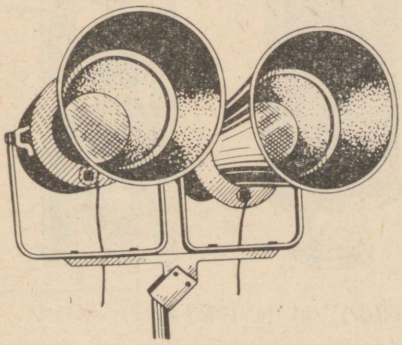
mis põhjustab kõrgsagedusliku helikomponendi ω moduleerimise ruupori sisendis (muutub vool läbi takistuse r analoogskeemis) ja kombinatsioonsageduste $\omega \pm n\Omega$ tekkimise.

Peale tüübi 10ГРД-5 toodetakse veel ruuporvaljuhääldeid 25ГРД-2 nimivõimsusega 25 V ja 50ГРД-8 nimivõimsusega 50 W. Kõigi kolme põhitüübi sageduskarakteristikud on toodud joonisel 5.22 ja tehnilised andmed tabelis 5.3. Nende tüüpide baasil on konstrueeritud ja toodetakse veel samavõimsuselisi eri variante kasutamiseks nii tolmustes ja ferromagnetilisi kübemeid sisaldavates tööstusruumides kui ka plahvatusohtlikes ruumides või kaevandustes, kus võib leiduda kaevandusgaasi. Valjuhääldi 100ГРД-1 nimivõimsusega 100 W koosneb kahest valjuhääldist 50ГРД-8, mis on kinnitatud kõrvuti ühisele alusele (joon. 5.23).

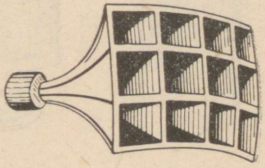


Joon. 5.22. Ruuporvaljuhääldite sageduskarakteristikud

Kasutamisel kõrgete helisageduste valjuhäälditena võimsates heliülekandesüsteemides kujundatakse ruupor mitmekanalisena nn. *sektsioon- e. liitruuporina.* See koosneb paljudest elementaarruuporitest, mis lehvikukujuliselt laienevad (joon. 5.24). Sellega antakse ruuporile laiem suunakarakteristik kõrgetel sagedustel. Algusosas ehk ruupori kõris kanalid ühinevad. Liitruupori puuduseks on keerukas tehnoloogia ja kõrge hind. Seepärast on välja töötatud nn. hajutava helilääetsega ruupor, kus suunakarakteristiku



Joon. 5.23. Ruuporvaljuhääldi 100ГРД-1



Joon. 5.24. Liitruupor

laiendamine toimub ruupori laia ja madalasse väljundavasse paigutatud vaheseinte abil [81, 122]. Ruupori väljundavale eriti laia ja madala kuju andmisega on õnnestunud saada vajalikult lai suunakarakteristik kõrgetel sagedustel ka ilma hajutavate vaheseinteta [120, 122].

Ruuporvaljuhääldite põhiandmed on tabelis 5.3.

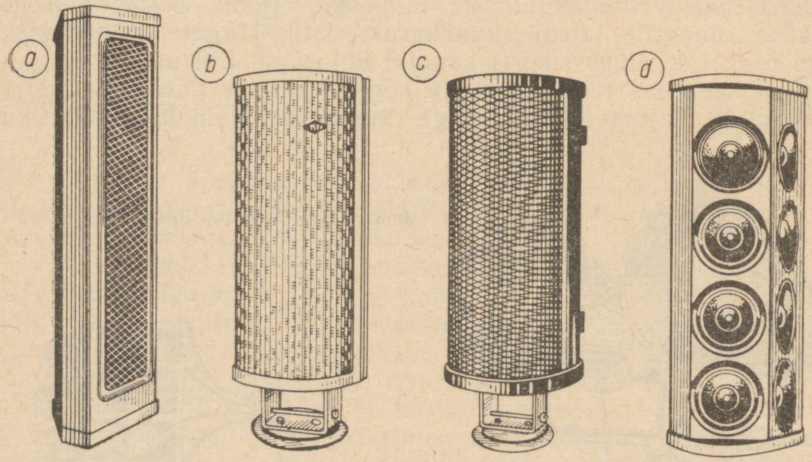
5.4. PÜSTIK- JA RADIAALKÕLARID

Kvaliteetseks heliülekandeks ruumides ja ka vabas õhus (lauluväljakuil, vabaõhuetendusil jne.) toodetakse *tulp*-e. *püstikkõlareid,* kus ühisesse vertikaalsesse korpusesse on paigutatud 4 kuni 8 standardset elektrodünaamilist valjuhääldit (joon. 5.25). Valjuhääldid on lülitatud sünfaasselt, s. t. kõigi koonused võnguvad samaaegselt sisse- või väljapoole.

Siseruumides kasutatava püstikkõlari 2КЗ-1 metallkasti mõõtmed on 562×120×73 mm ja see sisaldab ülestikku paigutatuna 5 valjuhääldit 0,5ГД-12, mida toidetakse läbi sobitustrafo liinipingega 30 või 120 V.

Analoogilise konstruktsiooniga on ka püstikkõlar 8КЗ-1 (joon. 5.25.*a*), mis sisaldab 4 valjuhääldit 2ГД-19М, koguvõimsusega 8 W.

Püstikkõlarid 10КЗ-1 ja 10КЗ-2 on vastavalt kas metall- või puitkorpusega (joon. 5.25.*b*,*c*) ja sisaldavad 8 valjuhääldit 2ГД-19М ülestikku kahes tulbas (joon. 5.25.*d*). Tulbad on pööratud 60°, et laiendada kõlari suunakarakteristikut horisontaalsihis (joon. 5.26). Sobitustrafo on toidetav pingega 30, 120 või 240 V ja kõlari

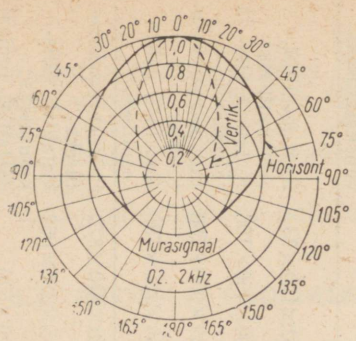


Joon. 5.25. Püstikkõlarid 8КЗ-1 (*a*), 10КЗ-1 (*b*) ja 10КЗ-2 (*c*); kõlari 10КЗ-2 sisevaade (*d*)

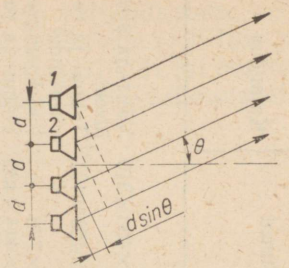
Ruuporvaljuhääldite ja kõlarite tehnilisi andmeid Tabel 5.3

Tüüp	Nimivõimsus VA	Valjuhääldid (kõlarites) Tüüp	Arv	Taasestatav sagedusala kHz	Sagedus karakteristiku ebaühtlus dB	Mittelineaarmoonutus %	Nimitoitepinge V	Näivtakistus toitepingel 120 V Ω	Helirõhk nimivõimsusel 1 m kaugusel Pa	Mass kg	Mõõtmed mm	Kujundus
Ruuporvaljuhääldid												
10ГРД-5	10			0,2 ... 4,0	18	7	30/120		8,0	7	540×480×310	Välis- ja sisekasutuseks
10ГРД-6	10			0,5 ... 3,55	15	10	30/120		15,0	8	330×452×432	Tolmu- ja rauapurukindel
25ГРД-2	25			0,1 ... 6,0	15	7	30/120		16,0	15	411×770	Väliskasutuseks
25ГРД-5	25			0,5 ... 3,55	15	10			24,0	8	333×444×430	Tolmu- ja rauapurukindel
25ГРД-8РВ	25			0,5 ... 4,0	18	10			19,0	22	407×330×446	Mäegaasikindel
25ГРД-ВЗГ	25			0,5 ... 4,0	18	10				22	407×330×446	Plahvatuskindel
50ГРД-8	50			0,12 ... 6,0	15	7			22,0	18	410×720	Välis- ja sisekasutuseks
50ГРД-9	50			0,1 ... 6,0	15	7			33,5	25	860×720×1120	
100ГРД-1	100			0,12 ... 5,5	15	7			47,5	35	910×770×1148	2 tk. 50ГРД-8, väliskasutuseks
Püstik- ja radiaalkõlarid												
2КЗ-1	2	0,5ГД-12	5	0,16 ... 7,0	15		30/120	7200		3,8	562×120×73	Kast metallist, sisekasutuseks
8КЗ-1	8	2ГД-19М	4	0,18 ... 6,0	15	3	30/120	1800	2,7	7,0	800×150×106	Metallist, sise- ja väliskasutuseks
10КЗ-1	10	2ГД-19М	8	0,12 ... 8,0	15			1440	2,5	15	300×320×750	Puidust, sisekasutuseks
10КЗ-2	10	2ГД-19М	8	0,12 ... 8,0	15			1440	2,5	10	386×256×780	Metallist, väliskasutuseks
25КЗ-1	25	4ГД-28	8	0,1 ... 8,0	15		30/120/220	576	4,0	19	360×310×870	Puidust, sisekasutuseks
25КЗ-2	25	4ГД-28	8	0,1 ... 8,0	15			576	4,0	20	415×325×860	Metallist, väliskasutuseks
10ГДН-1	10	4ГД-1	4	0,08 ... 8,0	15	3		1440	2,2	10	620×520	Metallist, radiaalne
25ГДН-1	25	10ГД-20	4	0,08 ... 8,0	16			576	4,0	24	740×677	Sise- ja väliskasutuseks.

Märkus. Ruuporvaljuhääldite mass on antud ilma kinnitusaluseta ja mõõtmed koos kinnitusalusega.



Joon. 5.26. Püstikkõlarite 10К3-1 ja 10К3-2 suunakarakteristik



Joon. 5.27. Püstikkõlari suunakarakteristiku arvutamise juurde

helitugevuse reguleerimiseks on trafo sekundaarmähis ümberlülitatav poolele või veerandile nimiväljundvõimsusele. Puitkorpusega variant 10К3-2 on ette nähtud kasutamiseks vaid siseruumides.

Samasuguse konstruktsiooniga on ka püstikkõlarid 25К3-1 ja 25К3-2, mis sisaldavad 8 valjuhääldit 4ГД-28.

Kõlarite andmed [89] on tabelis 5.3.

Püstikkõlarid kinnitatakse kas posti otsa või seinale ja neile on iseloomulik võrdlemisi terav suunakarakteristik vertikaaltasandis (joon. 5.26). Tingitud on see sellest, et valjuhääldid on paigutatud ülestikku (joon. 5.25.*d*), mistõttu kiirguri mõõtmed vertikaalsihis on tunduvalt suurenenud. Horisontaalne suunakarakteristik ei erine üksiku valjuhäältdi suunakarakteristikust ning sõltub koonuse läbimõõdu $2R$ ja lainepikkuse λ jagatisest, nagu näidatud joonisel 3.24. Vertikaalne suunakarakteristik on määratav samalt graafikult, kuid kiirguri vertikaalsihis suurenenud mõõtmete tõttu tuleb nüüd suuruseks $2R$ võtta korrutis Nd, kus N on ülestikku asuvate valjuhäältdite arv ja d nende vahekaugus. Seletub see järgmiselt.

Olgu püstikkõlarist kaugusel $l \gg Nd$ helirõhk valjuhääldist *1* (joon. 5.27) $p_1 = p_m \exp j\,(\omega t - kl)$; siis valjuhääldist *2* kiiratud helilaine on nihutatud käiguvahe $d \sin \Theta$ võrra, mistõttu helirõhk sellest $p_2 = p_m \exp j[\omega t - k(l + d \sin \Theta)]$ ning üldjuhul i-st valjuhäältdist $p_i = p_m \exp j\,\{\omega t - k[l + (i-1) \sin \Theta]\}$. Summaarne helirõhk suunas Θ

$$p_\Theta = \sum_{i=1}^{N} p_i = p_m e^{j(\omega t - kl)} \sum_{i=1}^{N} e^{j(i-1)kd \sin \Theta}. \qquad (5.24)$$

Arvestades, et helirõhk akustilise telje sihis, kus $\Theta = 0$, on $p_0 = Np_1 = Np_m \exp j\,(\omega t - kl)$, ja kasutades geomeetrilise rea summa valemit [16], saadakse suunakarakteristiku teguriks

$$\dot{D}_k(\Theta) = \frac{p_\Theta}{p_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} e^{j(i-1)kd \sin \Theta} = \frac{1}{N} \frac{e^{jNkd \sin \Theta} - 1}{e^{jkd \sin \Theta} - 1}. \qquad (5.25)$$

Valemite $e^{jx} = \cos x + j \sin x$ ja $1 - \cos 2\alpha = 2 \sin^2 \alpha$ abil on leitav suunakarakteristiku absoluutväärtus $\dot{D}(\Theta)$ moodulina [133]:

$$|\dot{D}_k(\Theta)| = \left| \frac{p(\Theta)}{p(0)} \right| = \frac{\sin\left(N \frac{\pi d}{\lambda} \sin\Theta\right)}{N \sin\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin\Theta\right)}. \qquad (5.26)$$

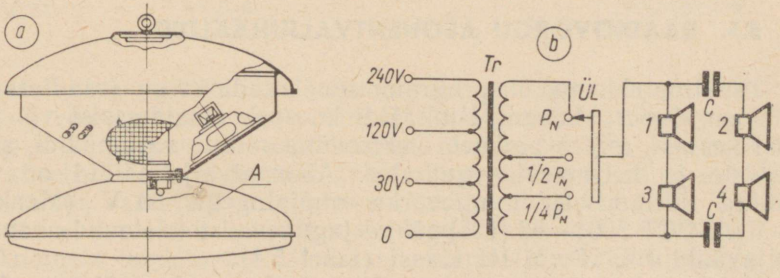
Kui lainepikkus $\lambda \geqslant \pi d \sin\Theta$, on viimane valem samaväärne kolbkiirguri suunakarakteristiku valemiga 3.60, mis lubabki viimase graafikut (joon. 3.24) siin kasutada.

Kõrgematel sagedustel, kus iga üksiku valjuhääldi kiirgus on suunatud, saadakse kõlari resulteeriv suunakarakteristik vertikaaltasandis üksiku valjuhääldi suunakarakteristiku $D(\Theta)$ (valem 3.60) kordsena $D_k(\Theta)$. Olgu lisatud, et nii viimane seos kui ka valem 5.23 on kasutatav ka ridamisi paigutatud mikrofonigrupi suunakarakteristiku määramiseks.

Püstikkõlarite sageduskarakteristik helirõhu järgi on palju ühtlasem ja väiksemate sakkidega kui vastava üksikvaljuhääldi oma, sest sakkide asukoht on eri eksemplaridel teatud määral juhuslik. Kuid kõlari suhteliselt väikese ruumala tõttu on nende sageduskarakteristikul sagedustel alla 200 Hz langus: 20 dB oktaavi kohta kõlaritel 2K3-1 ja 8K3-1 ning 10 dB oktaavi kohta kõlaritel 10K3-1, -2 ja 25K3-1, -2. Tarbe korral tuleb see kompenseerida vastava korrektsiooniga võimendis.

Radiaalkõlarid e. radiaalsed valjuhääldid on horisontaaltasandis ringikujulise suunakarakteristikuga. Toodetavad tüübid on 10ГДН-1 (nimivõimsusega 10 VA) ja 25ГДН-1 (nimivõimsusega 25 VA). Mõlemad on ühesuguse konstruktsiooniga (joon. 5.28), erinedes vaid mõõtmete, massi ja sisalduvate standardsete valjuhääldite poolest. Radiaalkõlarid on kasutatavad nii siseruumides kui ka väljas ja kinnitatakse kas posti otsa, toendi (kronsteini) külge või riputatakse lakke.

Kõlarid sisaldavad neli elektrodünaamilist valjuhääldit, mis on paigutatud sümmeetriliselt neljas suunas ning kallutatud püst-



Joon. 5.28. Radiaalkõlari välisvaade (*a*) ja ühendusskeem (*b*)

sihist 35° võrra. Kõlari alaosa A töötab helihajutajana ja tagab ühtlase, ringikujulise suunakarakteristiku.

Radiaalkõlarite ühendusskeem on toodud joonisel 5.28.*b*. Sobitustrafo *Tr* võimaldab lülitada kõlareid translatsioonivõrku standardse nimipingega 240 V, 120 V või 30 V. Lülitiga *UL* saab vajaduse korral vähendada kõlari väljundvõimsust poolele või veerandile nimivõimsusest. Märkimist väärib, et kaks diametraalselt paiknevat valjuhääldit *2* ja *4* saavad eralduskondensaatorite *C* tõttu vaid kõrgemasageduslikku helipinget. Madalamatel helisagedustel, kus suunakarakteristik on ringikujuline, piisab nominaalse helirõhu tekitamiseks kahest valjuhääldist *1* ja *3*. Kõrgematel helisagedustel muutub valjuhääldite kiirgus suunatuks ja ühtlase suunakarakteristiku saamiseks ongi vaja nelja valjuhääldit.

Valjuhääldite faseerimiseks kõlarites kasutatakse kas madalat alalispinget või mikroampermeetrit (testrit) mõõtepiirkonnaga mitte üle 100 μA.

Faseerimiseks alalispingega ühendatakse alalispingeallikas pingega 1 ... 1,5 V hetkeks valjuhääldi võnkepooliga ning jälgitakse koonuse liikumissuunda. Võnkepooli plussklemmiks loetakse tinglikult klemmi, mille ühendamisel patarei plussklemmiga koonus liigub väljapoole (põhilise helikiirgumise suunas).

Faseerimiseks testriga ühendatakse see märgitud piirkonnal μA võnkepooliga. Surudes kergelt koonust väljapoole, jälgitakse osuti väljalöögi suunda. Võnkepooli plussklemmiks loetakse tinglikult klemmi, mille ühendamisel testri plussklemmiga saadakse positiivne väljalöök. Vastavalt normidele [125] on plussklemmi juurde valjuhääldi korvile tehtud värviline täpp.

Kõlaris valjuhääldite jadalülituse saamiseks tuleb ühe võnkepooli plussklemm ühendada teise miinusklemmiga jne. Rööplülitusel tuleb ühendada võnkepoolide samanimelised klemmid omavahel. Kõlari plussklemmi külge tuleb ühendada valjuhääldi(te) plussklemmid.

Kui ruumis või väljakul on mitu kõlarit, tuleb ka need ühendada sünfaasselt, s. t. ühendada omavahel kõlarite samanimelised klemmid.

5.5. RAADIOVÕRGU ABONENTVALJUHÄÄLDID

Tavaline ehk nn. üheprogrammiline raadiovõrgu (raadiotranslatsioonivõrgu) abonentvaljuhääldi koosneb plastmassist või puidust kestast, milles paikneb elektrodünaamiline valjuhääldi, sobitustrafo ja helitugevusregulaator. Abonentvaljuhääldid on ette nähtud lülitamiseks raadiovõrku nimipingega 30 V (Moskvas 15 V). ГОСТ 5961—66 [125] põhjal jagunevad toodetavad abonentvaljuhääldid I, II või III klassi (tabel 5.4).

Helitugevuse reguleerimine võib olla kas pidev või astmeline.

Tabel 5.4

Abonentvaljuhääldite klassid

Parameetri nimetus	I klass	II klass	III klass
1. Sagedusala kHz	0,071 ... 10	0,1 ... 6,3	0,16 ... 5,0
2. Sageduskarakteristiku ebaühtlus dB	12	15	15
3. Sisendtakistus suurimal helitugevusel, kΩ	1,8	3,6	6,0
4. Keskmine helirõhk 1 m kaugusel maksimaalsel helitugevusel, Pa	0,4	0,3	0,25
5. Mittelineaarmoonutus % suurimal helitugevusel sagedusalas			
100 ... 200 Hz	7	7	—
üle 200 ... 400 Hz	4	4	5
üle 400 Hz	3	3	3
6. Helitugevuse reguleerimisulatus dB	40	36	32

Tabel 5.5

III klassi abonentvaljuhääldite andmeid

Nimetus	Valju-hääldi	Kasti materjal	Kasti mõõtmed mm
«Efir»	1ГД-30	Plastmass	238×134×70
«Nevski»	1ГД-30	Puit	238×134×70
«Gžatsk»	1ГД-28	Plastmass	254×144×66
«Moskvitš»	1ГД-28	„	245×140×55
«Volga-67»	1ГД-30	„	250×140×55
«Sjurpriz»	1ГД-30	„	245×140×55
«Jubileinaja»	1ГД-30	„	242×150×70
«Jahont»	1ГД-30	„	250×139×72
«Taiga-2, -3»	2ГД-11	„	200×165×110
«Ritm»	1ГД-28	„	250×146×65
«Dziesma»	1ГД-6	„	270×162×90

I klassi abonentvaljuhääldil peab olema sageduskompenseeritud helitugevusregulaator vastavalt tajutavale helivaljusele.

Igat kuuldepunkti raadiovõrgus toidetakse läbi kaitsetakisti (tavaliselt 600 Ω), et juhuslik lühis mõne abonendi juures ei mõjutaks teiste, samalt fiidrilt toidetavate valjuhääldite tööd. Kaitsetakistid paiknevad tavaliselt maja trepikojas fiidri harukarbis.

Andmeid toodetavate III klassi abonentvaljuhääldite kohta on tabelis 5.5 [89].

Kolmeprogrammilisi abonentvaljuhääldeid kasutatakse suuremates linnades, kus raadiovõrk on kolmeprogrammiline: I programm tavalises helisagedusribas 50 ... 10000 Hz (pingel 15 või 30 V), II ja III programm kõrgsagedusribas, amplituudmoduleeritud kandesagedustega vastavalt 78 kHz ja 120 kHz, pingel 0,3 V.

Programmide eraldamiseks paiknevad valjuhääldi kastis vastavad eraldusfiltrid. Filtrite kõrgsageduslik väljundpinge detekteeritakse ja võimendatakse transistor-helisagedusvõimendis. Võimendi alaldit toidetakse vahelduvpinge võrgust 220 või 127 V, 50 Hz [103].

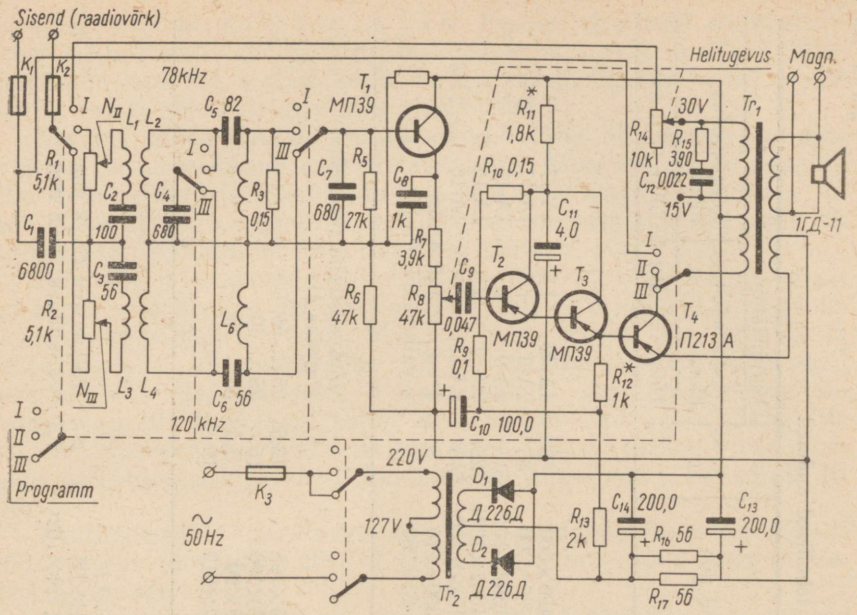
Kolmeprogrammilise raadiovõrguga saab üle kanda ka stereosaateid. Seepuhul kantakse I programmil tavalises helisagedusribas üle üks kanal ja II või III programmil teine kanal. Stereosaate kuulamiseks tuleb raadiovõrku lülitada peale kolmeprogrammilise abonentvaljuhääldi veel tavaline abonentvaljuhääldi. Valjuhääldite kaugus omavahel ja kuulajast sõltub kuulamiseks kasutatava ruumi suurusest ning on tavaliselt 2 ... 3 m. Kuna ülekandel kõrgsagedusribas tekivad paratamatult parasiitsed faasimoonutused, on saadav stereoefekt kahjuks puudulik.

Toodetakse kolmeprogrammilisi II klassi abonentvaljuhääldit «Aurora» ja III klassi valjuhääldit «Riga» (ГТВ-64). «Riga» skeemil (joon. 5.29) on näha eraldusfiltrid II programmi jaoks (L_1, L_2, C_2, C_5, L_5) ja III programmi jaoks (L_3, L_4, C_3, C_6, L_6), mille väljundisse lülitatakse emitterdetektor transistoriga T_1 (МП39). Filtrite sisendpinget reguleeritakse potentsiomeetritega R_1 ja R_2. Detekteeritud pinge võimendatakse transistorhelisagedusvõimendis, kus transistorid T_2, T_3 ja T_4 moodustavad nn. liittransistori. Viimase tööpunkt reguleeritakse välja tehases takistite R_{11} ja R_{12} suuruse valikuga. Võimendi väljundisse on lülitatud sobitustrafo Tr_1, mille sekundaarmähis on koormatud valjuhääldiga. Valjuhääldi võnkepooliga on ühendatud väljundpuksid magnetofoni jaoks saadete salvestamiseks. Mittelineaarmoonutuse vähendamiseks on lõppaste transistoril T_4 hõlmatud negatiivse tagasisidega. Selleks on Tr_1 tagasisidemähis lülitatud T_4 emitterahelasse. Võimendit toidetakse täisperioodalaldist (dioodid D_1 ja D_2) läbi silufiltri C_{14}, R_{16}, R_{17}, C_{13}. Alaldi trafo Tr_2 lülitatakse toitevõrku vaid II ja III programmi vastuvõtul.

I programmi vastuvõtul ühendatakse Tr_1 primaarmähis vahetult raadiovõrguga ning helitugevust reguleeritakse potentsiomeetriga R_{14}. Viimase liugkontakt ühendatakse tehases primaarmähise vastava väljavõttega (30 V või 15 V).

II ja III programmi vastuvõtul reguleeritakse helitugevust potentsiomeetriga R_8, mis on R_{14}-ga ühisel võllil. Filtrite sisendnivoo reguleeritakse potentsiomeetritega R_1 ja R_2 nii, et helitugevusregulaatori sama asendi juures oleks vastuvõtt II-l ja III-l programmil ühetugevune I programmi vastuvõtuga.

Kaitsmed K_1 ja K_2 kaitsevad seadme sisendosa ekslikku lülitamise puhul tugevvooluvõrku.



Joon. 5.2. Kolmeprogrammilise abonentvaljuhääldi «Riga» (ГТВ-64) skeem

«Riga» (ГТВ-64) tehnilisi andmeid: väljundvõimsus 0,15 W; tundlikkus II ja III programmil vähemalt 0,3 V 600-Ω kaitsetakisti ruhul; sisendtakistus 700 Ω; ülekostuvused programmide vahel alla —53 dB, omamüra —40 dB. Võrgust tarbitav võimsus 4,5 W.

5.6. KINODE UNIFITSEERITUD HELIAPARATUUR «ZVUK»

Heliaparatuur «Zvuk» koosneb unifitseeritud kõlaritest ja lõpp- ning eelvõimendeist, mis mitmesugustes kombinatsioonides on kasutatavad kinosaalis mahutavusega 200 ... 2500 kohta [120, 122].

Lõppvõimendeid on kolme tüüpi: УО-11, -13 ja -15 väljundvõimsusega vastavalt 25, 50 ja 100 W. Tüüpseid kõlareid on viis. Kõlarid on invertoravaga ja kahekanalilised, eraldussagedusega 1200 Hz. Viimane on valitud kõrgem varemkasutatutest (550 või 800 Hz), et vähendada moonutusi ruuporite helipeades ja suurendada nende tööiga. Transpordi ja montaaži hõlbustamiseks koosneb kõlar võimsusega 100 W kahest tüüpsest kõlarist võimsusega á 50 W (30А-66). Unifitseeritud ritta kuuluvad veel ühe valjuhääldiga kõlarid 25А-44 ja -46 võimsusega vastavalt 6 ja 1,5 W.

Kinode unifitseeritud heliaparatuuri «Zvuk» kõlarite ja valjuhääldite tehnilised andmed

Tüüp	Võimsus W	Keskmine standardne helirõhk N/m²	Taasestatav sagedusala ebaühtlusega 12 dB Hz	Sisendtakistus sagedusel 1000 Hz Ω	Mõõtmed mm	Mass kg	Valjuhääldid			
							Madalsagedus-likud		Kõrgsagedus-likud	
							Tüüp	Arv	Tüüp	Arv
Kõlarid										
30A-46	12	0,35	60 ... 14000	300	980×490×360	40	4A-32	1	1A-17	1
30A-68	25	0,3	55 ... 12000	144	1160×730×460	65	2A-9	1	1A-17	2
30A-64	50	0,3	55 ... 12000	72	1760×1382×1021	315	2A-9	2	1A-16	2
30A-66	50	0,35	40 ... 14000	72	1760×1382×1021	325	2A-11	2	1A-16	4
30A-62	100	0,35	40 ... 14000	36	3237×1382×1021	615	2A-11	2×2	1A-16	2×4
25A-44	6	0,25	80 ... 12000	600	330×330×210	8	1 valjuhääldi 4A-28			
25A-46	1,5	0,25	100 ... 12000	2400	300×269×280	7	1 valjuhääldi 4A-28			
Koonusvaljuhääldid							Võnkesüsteemi resonantsisagedus Hz			
2A-9	25	0,3	40 ... 1200	15	Ø 385×195	13,5	35 ... 55			
2A-11	25	0,35	35 ... 3000	15	Ø 465×190	15	25 ... 40			
4A-28	6	0,28	60 ... 14000	15	Ø 258×90	1,5	50 ... 70			
4A-32	12	0,35	40 ... 14000	15	Ø 352×210	10	40			
Ruuporvaljuhääldite helipead										
1A-17	8	0,7	800 ... 12000	20	Ø 141×95	6	Väljundava Ø 28 mm			
1A-16	10	0,8	500 ... 14000	26	126×124×162	7,3	Väljundava Ø 28 mm			

Kõigi kõlarite toitepinge on 60 V. Nende tehnilised andmed on tabelis 5.6. Samas on toodud kõlarites kasutatavate valjuhääldite tehnilised andmed. Valjuhääldid on püsimagnetiga, tüüpidel 4A-28 ja -32 on kõrgete helisageduste lisakoonus.

Kõrgete helisageduste ruuporvaljuhääldite helipeades on diafragma duralumiiniumi asemel lavsaanist, tänu millele on paranenud helikvaliteet ja suurenenud tööiga. Kasutatakse madala ja laia väljundavaga ruuporeid, mistõttu nende suunakarakteristik on küllaldaselt ühtlane ka ilma hajutava läätseta (vt. § 5.3).

Kõlarites paiknevate sobitustrafode sekundaarmähis on väljavõttega $^3/_4$ ja $^1/_2$ keerdude arvu pealt, mistõttu kõlarid on ümberlülitatavad poolele või veerandile nimivõimsusest. See on vajalik heliaparatuuri häälestamiseks pärast montaaži vastavalt saali akustilistele iseärasustele. Eraldusfiltrid sageduskarakteristiku langusega 12 dB oktaavi kohta on lülitatud trafo ja valjuhääldite vahele. Sisseehitatud ümberlülitiga saab kõlari reguleerimisel kõrgete helisageduste filtri väljundpinget vähendada 3, 6 või 9 dB võrra.

Unifitseeritud aparatuuris on kaks eelvõimendiplokki: УП-25 töötamiseks fotorakult ФЭУ-2 ja УП-27 töötamiseks magnetilistelt helipeadelt.

Võimsusvõimendites on lõpplambiks kahekordne jugatetrood 6P3C väljundvõimsusega 25 W. Lamp on spetsiaalselt konstrueeritud kinode heliaparatuuri jaoks ning töötab anoodpingega 400—500 V.

Kirjeldatud unifitseeritud plokkidest on koostatud kuus tüüpset komplekti vastavalt saali mahutavusele ja demonstreeritavate filmide iseloomule:

«Zvuk 1—25» — ühekanaliline, reservita, 300 kohaga saalile;

«Zvuk 4—25» — neljakanaliline á 25 W, stereoheliga laiekraanfilmide demonstreerimiseks kuni 500 kohaga saalis;

«Zvuk 1—50» — ühekanaliline, 50 W, 300 kohaga saalile;

«Zvuk 4—50» — neljakanaliline á 50 W, stereoheliga laiekraanfilmide demonstreerimiseks kuni 1000 kohaga saalis;

«Zvuk 6—50» — kuuekanaliline á 50 W, stereoheliga laifilmide (70 mm) demonstreerimiseks kuni 1200 kohaga saalis;

«Zvuk 6—100» — kuuekanaliline á 100 W, stereoheliga laifilmide (70 mm) demonstreerimiseks kuni 2500-kohaga saalis.

Eritellimise järgi valmistatakse veel üheksakanalilist heliaparatuuri võimsusega 50 või 100 W kanalis panoraamkinodele mahutavusega vastavalt kas 1000 või 2000 kohta.

6.

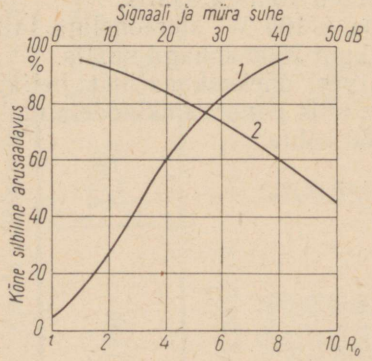
Helivõimendus ruumis ja väljakul

Sageli ei piisa primaarse heliallika võimsusest kogu ruumi või väljaku ulatuses vajaliku helivaljuse tekitamiseks. Sel juhul kasutatakse ruumis ja väljakul helivõimendust.

Kuuldavust ruumis halvendavad suur müratase ja liiga suur peegeldunud heli ja otseheli suhe. See nähtub ka jooniselt 6.1, kus kõver *1* kujutab kõne silbilise arusaadavuse sõltuvust kõne (signaali) taseme ja müra taseme suhtest. Samal joonisel kujutab kõver *2* kõne silbilise arusaadavuse sõltuvust peegeldunud heli ja otseheli suhtest R_0 [43].

Helivõimenduse puhul tuleb arvestada ka seda, et inimkõrv on harjunud teatud peegeldunud ja otseheli suhtega ning samuti heli teatud valjusega.

Kõne normaalseks valjuseks peetakse 80 ... 85 dB, nõrgem või valjem kõne ei ole hästi arusaadav ja samuti jääb vajaka muusika



Joon. 6.1. Kõne silbilise arusaadavuse sõltuvus signaali ja müra suhtest (*1*) ning peegeldunud heli ja otseheli suhtest (*2*)

emotsionaalsusest (joon. 6.2.*a*). Muusika valjuseks on ruumis lubatud kuni 105 dB. Helitasemete erinevus ruumi erinevates punktides võib olla 6 ... 10 dB piires [113] [124].

Helivõimenduse arvutamisel on vaja:

1) määrata ruumi helineelduvus ($S\alpha_k$),

2) arvutada kõlarite helivõimsus, mis on vajalik normaalse valjusega otseheli tekitamiseks,

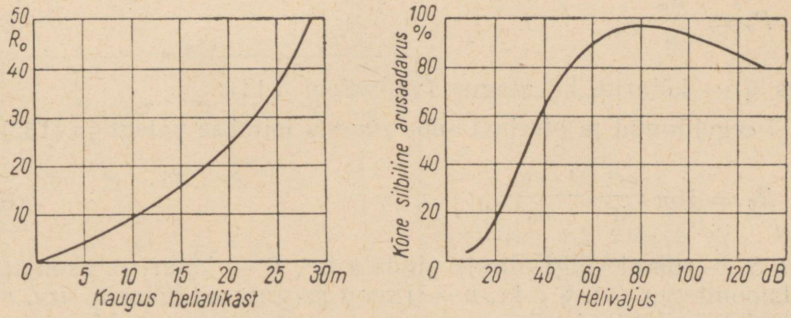
3) valida sobiv kõlarite paigutus,

4) arvutada kõlarite poolt tekitatud helivälja tihedus,

5) valida vajalik võimendusaparatuur.

Kasutatavate helivõimendusseadmete kvaliteet peab vastama vähemalt ringhäälingu I klassi helikanali kvaliteedile.

Ruumide ja väljakute helivõimenduselt nõutakse, et kuulajaile näiks võimendatud heli saabuvat ettekandja suunast. See nõuab kõlarite otstarbekohast paigutust ja kõrgekvaliteedilise heliaparatuuri kasutamist.



a *b*

Joon. 6.2. Peegeldunud ja otseheli suhte R_0 sõltuvus heliallika kaugusest (*a*) ning kõne silbilise arusaadavuse sõltuvus helivaljusest (*b*)

6.1. RUUMI AKUSTILINE ISELOOMUSTUS

Ruumis vajaliku helivõimenduse suurus oleneb ruumi mahust, heli neeldumisest tema pindades ning ruumis olevates esemetes ja vajalikust helitasemest.

Aktiivse akustikaga ruumi helivõimendussüsteemi mikrofonid paigutatakse tavaliselt lavale (poodiumile), erandjuhtudel ka saali, kuid viimasel juhul võib tekkida raskelt kõrvaldatav akustiline tagasisidestus.

Laval, mikrofonide juures peab kõne arusaadavus olema hea. Selleks on vaja, et laval oleks peegeldunud ja otseheli suhe R_0 väike (vt. joon. 6.2.*a*). See omakorda tingib, et lavaruumi reverbe-

ratsiooniaeg oleks väike. Selle saavutamiseks tuleb lavapindade katmiseks kasutada suure neeldumisteguriga materjale. Samuti on vaja laval kasutada terava suunakarakteristikuga mikrofone ning esineja peab asuma mikrofonile võimalikult lähedal.

6.2. HELITASEME MÄÄRAMINE RUUMIS JA KÕLARITE PAIGUTUS

Vajalik akustiline võimsus P_a, mida on vaja helirõhu p tekitamiseks ruumis mahuga V (m³),

$$P_a = \frac{p^2 V \cdot 10^{-5}}{T}, \tag{6.1}$$

kus T — reverberatsiooniaeg sek.

Vajalik elektriline võimsus

$$P_e = \frac{P_a}{\eta}, \tag{6.2}$$

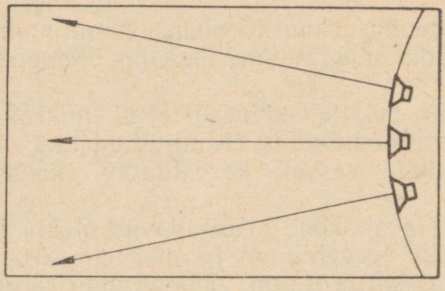
kus η — kõlarite kasutegur (vt. valem 5.14).

Peegeldunud ja otseheli suhe ruumis leitakse valemiga [132]

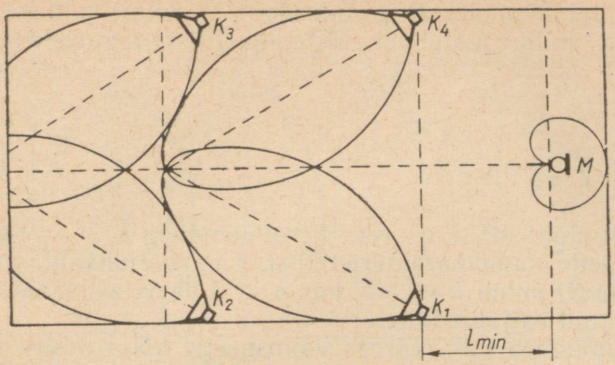
$$R_0 = 16\pi \frac{nr^2}{S\Gamma} \cdot \frac{1 - \alpha_k}{\alpha_k}, \tag{6.3}$$

kus S — ruumi kõigi piirete pindala m², Γ — kõlari telgkontsentratsioonitegur (vt. § 5.1), n — ruumi paigutatud kõlarite arv, r — kõlari ja mikrofoni vahekaugus m, α_k — keskmine neeldumistegur (sagedusel 550 Hz).

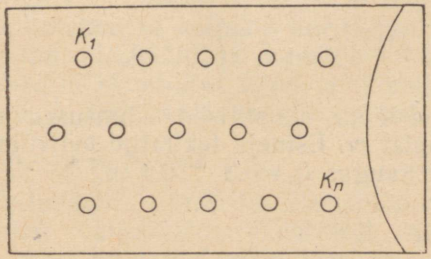
Kõlarite paigutus ruumis võib olla kas tsentraliseeritud, tsonaalne või hajutatud. Tsentraliseeritud süsteem koosneb kõlarite grupist, mis on paigaldatud ruumi ühte punkti, (joon. 6.3). Tso-



Joon. 6.3. Kõlarite tsentraalne paigutus



Joon. 6.4. Kõlarite $K_1 \ldots K_4$ tsonaalne paigutus ja nende helivälja jaotus ruumis (M — mikrofon)



Joon. 6.5. Kõlarite $K_1 \ldots K_n$ hajutatud paigutus

naalsel paigutusel on kõlarid paigutatud gruppidena ruumi mitmesse punkti (joon. 6.4). Hajutatud paigutusel koosneb süsteem väikese võimsusega kõlaritest, mis on paigutatud kogu ruumi ulatuses ühtlaselt (joon. 6.5).

6.3. AKUSTILINE TAGASISIDESTUS JA SELLE VÄLTIMINE

Mikrofonide ja kõlarite asukoha määramisel ruumis on vaja arvestada kaht põhitingimust:

a) kuulajate suhtes tuleb kõlarid paigutada võimalikult mikrofoni lähedale, et kuulajale näiks, nagu tuleks võimendatud heli ettekandjalt;

b) akustilise tagasisidestuse vältimiseks tuleb kõlarid paigutada mikrofonist võimalikult kaugemale.

Ühe kõlari puhul määratakse mikrofoni ja kõlari minimaalne vahekaugus l_{min}, mille puhul ei teki akustilist tagasisidestust, valemiga

$$l_{min} = 0{,}057\sqrt{\frac{V}{Tk}}\ \text{m}, \tag{6.4}$$

kus V — ruumi maht m³, T — reverberatsiooniaeg s, k — tegur, mis sõltub kõlarite suunakarakteristikust. Ühe valjuhääldi puhul $k=0{,}3$; püstikkõlari puhul $k=0{,}3/n$, kus n — kõlaris asuvate vertikaalselt paigutatud valjuhäälditе arv.

Kui ruumis paikneb mitu võrdse võimsusega kõlarit, siis määratakse vahekaugus kõige lähemal asuvast kõlarist.

Suunatud mikrofonide kasutamisel sõltub l_{min} kõlarite ja mikrofonide akustiliste telgede asendist. Kui mikrofoni akustiline telg on suunatud vastupidiselt kõlari omale, siis l_{min} väheneb kardioidse suunakarakteristikuga mikrofonide puhul 3-...4-kordselt.

Pärast akustiliste arvutuste tegemist on vaja kontrollida kõlarite ja esineja akustiliste võimsuste suhet valemiga

$$\frac{P_a}{P_e} < \left(\frac{l_{min}}{l_m}\right)^2 + 1, \tag{6.5}$$

kus P_a ja P_e on kõlarite ja esineja akustilised võimsused ning l_m — esineja kaugus mikrofonist m. Esineja tekitatud helivõimsus on suurusjärgus 10^{-5} vatti ja kaugus $l_m=0{,}3...0{,}4$ m.

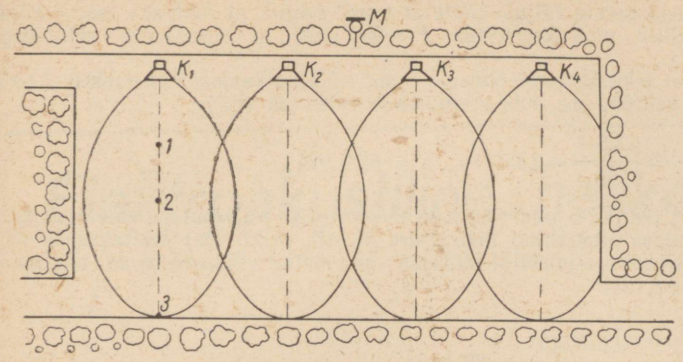
6.4. HELIVÕIMENDUS VÄLJAKUL

Ettekannete rahuldavaks kuuldavuseks väljakul on vaja, et kõne silbiline arusaadavus oleks vähemalt 70%. Selleks peab vastavalt normidele minimaalne helitase olema tribüünil 84 dB, staadioniväljakul 80 dB ja linnaväljakul 85 dB. Helitasemete vahe väljaku erinevates punktides ei tohi ületada 10 dB.

Helivõimendust vajavat väljakut tuleb hinnata tema helipeegelduse ja helineelduvuse seisukohalt. Tuleb selgitada, kas väljak on ümbritsetud puiestikuga või asuvad väljaku ääres kõrghooned. Tuleb ligikaudu määrata väljaku reverberatsiooniaeg. Erilist tähelepanu tuleb pöörata kaja tekkimise võimalusele ja selle vältimisele. Samuti tuleb arvestada väljakut täitvate inimeste arvu, sest see määrab väljakul vajaliku akustilise võimsuse.

Pärast väljaku akustiliste omaduste kindlakstegemist tuleb määrata kõlarite õige paigutus väljakul. Ühtlase helitugevuse saavutamiseks üle kogu väljaku tuleb kõlarite paigutamisel arvestada väljaku kuju ja väljaku pinna suurust.

Harilikult kasutatakse väljakuil ruuporvaljuhääldeid, kuid ka



Joon. 6.6. Väljaku katmine kõlarite K_1, K_2, K_3 ja K_4 helivälja-dega (M — mikrofon)

radiaal- või püstikkõlareid. Vajalik kõlarite võimsus arvutatakse järgmiselt.

Eeldatakse, et väljakul kui vabas ruumis on helirõhk p pöördvõrdeline valjuhääldi ja vaadeldava punkti vahekaugusega l. Seega valjuhääldi akustilisel teljel punktides *1*, *2*, *3* (joon. 6.6) on helirõhu p ja kauguse l korrutised võrdsed:

$$p_1 l_1 = p_2 l_2 = p_3 l_3. \tag{6.6}$$

Valjuhääldi tehnilistes andmetes on antud nimivõimsus P_0 ja seepuhul valjuhääldi akustilisel teljel ühe meetri kaugusel ($l = l_0 = l_m$) tekitatav helirõhk p_0 (nn. standardne helirõhk). Kasutades seost 6.6 on helirõhk p_1 punktis *1* kaugusel l_1 arvutatav valemiga

$$p_1 = \frac{p_0 l_0}{l_1} \tag{6.7}$$

Seega on võimalik määrata helirõhk valjuhääldi akustilisel teljel igas soovitud punktis. Et leida helirõhk punktis, mis ei asu valjuhääldi akustilisel teljel, tuleb valemiga 6.7 saadud väärtus korrutada valjuhääldi suunateguriga (vt. § 5.1).

Valemist 6.1 nähtub, et helirõhu ruut p^2 on võrdeline valjuhääldi akustilise võimsusega P_a. Näiteks kui valjuhääldi võimsuse P_0 puhul tekitab mingis punktis x helirõhu p_{x0} ja sama valjuhääldi võimsuse P_1 puhul tekitab samas punktis helirõhu p_{x1}, siis kehtib seos $P_0/p_{x0}^2 = P_1/p_{x1}^2$, millest järedub, et

$$P_1 = \frac{P_0 p_{x1}^2}{p_{x0}^2}. \tag{6.8}$$

Näide. Olgu vaja väljakul suurusega 90×70 m tekitada helitase 80...85 dB. Võrreldes toodetavate valjuhäältide andmeid selgub, et sobivaks osutub kõlar 50ГРД-9 elektrilise nimivõimsusega $P_0=50$ vatti ja standardse helirõhuga $p_0=33{,}5$ Pa.

Valitud kõlar tekitaks nimivõimsuse puhul väljaku vastasäärel punktis *3* kaugusel $l_3=70$ m helirõhu p_{30}, mis arvutatakse valemiga (6.7):

$$p_{30}=\frac{p_0 l_0}{l_3}=\frac{33{,}5\cdot 1}{70}=0{,}478 \text{ Pa, s. o. } 87{,}5 \text{ dB.}$$

Seega kõlari 50ГРД-9 nimivõimsuse puhul tekiks väljakul lubamatult tugev helivaljus. Normides ettenähtud helivaljuse 85 dB (0,361 Pa) tekitamiseks väljaku vastasäärel peab valjuhäältdi töötama vähendatud võimsusega P_1, mis määratakse valemi 6.8 abil:

$$P_1=\frac{P_0 p_{31}^2}{p_{30}^2}=\frac{50\cdot 0{,}361^2}{0{,}478^2}=28 \text{ vatti.}$$

Suurim lubatav helivaljus on 85 dB+10 dB=95 dB ja vastav helirõhk $p_1=1{,}14$ Pa.

Kõlari vähendatud võimsuse puhul leitakse valemi 6.7 abil kaugus kõlarist l_1, kus tekib maksimaalselt lubatud helirõhk p_1:

$$l_1=\frac{l_2 p_3}{p_1}=\frac{70\cdot 0{,}361}{1{,}14}=22 \text{ m.}$$

Joonestades kõlari karakteristiku helirõhul 85 dB ehk 0,361 Pa väljaku plaanile, selgub, et väljaku katmiseks normides ettenähtud helivajadusega on vaja kasutada nelja kõlarit (joon. 6.6).

Kui kahe kõlari (K_1 ja K_2) heliväljad kattuvad (joon. 6.6 punkt *B*), siis nende kattumiskohtades helivõimsused liituvad. Resulteeriv helivaljus peab jääma normidega ettenähtud piiresse ja arvutatakse üldjuhul detsibellides järgmise valemi abil:

$$N=10\lg\left(10^{0{,}1N_1}+10^{0{,}1N_2}+\ldots+10^{0{,}1N_n}\right) \text{ dB,} \qquad (6.8)$$

kus N_1, $N_2 \ldots N_n$ erinevad helivaljused dB, n — erinevate helivaljuste arv.

Näiteks olgu punktis *B* kahe kõlari K_1 ja K_2 poolt (joon. 6.6) tekitatud helivaljused vastavalt $N_1=80$ dB ja $N_2=82$ dB. Kasutades valemit 6.8 leitakse, et resulteeriv helivaljus punktis *B*

$$N=10\lg\left(10^{0{,}1\cdot 80}+10^{0{,}1\cdot 82}\right)=84{,}75 \text{ dB.}$$

Juhul kui leidub heli peegeldavaid pindu, mis on kõlarile ligemal kui 17 meetrit, siis nende poolt tekitatud kaja väljakul ei tajuta (vt. 2. ptk.).

Katsetest on selgunud, et juhul, kui otse- ja peegeldunud heli tasemete vahe on üle 10 dB, siis peegeldunud heli ei mõju ülekande arusaadavusele.

7.

Elektroakustiline helikanal

Elektroakustiliseks helikanaliks nimetatakse mitmesuguste akustiliste ja elektriliste seadmete jada, mida läbib ülekantav informatsioon oma teel allikast tarbijani. Ülekantava informatsiooni allikaks võib olla nii esineja kui ka mingi helikandja (magnetofonilint või heliplaat) salvestatud heliga. Tarbijaks on kõige üldisemal juhul kuulaja, kuid helitehnikas nimetatakse tarbijaks sageli ka elektrilist seadet või süsteemi (ringhäälingusaatjat, raadiovõrku, telefonikaugejaama, magnetofoni jms.), kus toimub ülekantava informatsiooni edasine töötlemine või salvestamine.

Elektroakustiline helikanal koosneb lülidest, milleks on:

1) ruum, kus toimub ettekanne;

2) mikrofonid, mis muundavad helienergia vastavaks elektrienergiaks e. elektriliseks helisignaaliks;

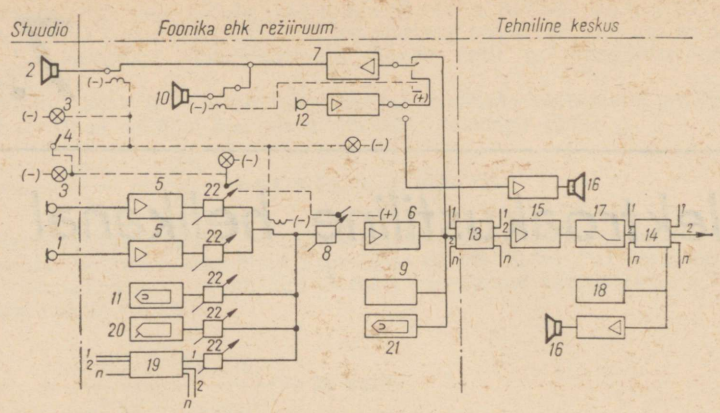
3) võimendid, mis võimendavad elektrilise helisignaali vajaliku tasemeni;

4) mikserid (reguleeritavad atenuaatorid), millega reguleeritakse helikanalis elektrilise signaali taset nii, et kanali väljundpinge ei ületaks tarbijaile lubatavat maksimaalset väärtust (viimase ületamine põhjustaks tarbijais suure mittelineaarmoonutuse tekkimise ja helikvaliteedi tunduva halvenemise);

5) visuaalsed ja akustilised kontrollseadmed, mis võimaldavad visuaalselt või kuulmise abil kontrollida elektrilise helisignaali taset ja kvaliteeti;

6) abiseadmed signalisatsiooniks ja kommutatsiooniks ning toiteseadmed ühes maandusega.

Joonisel 7.1 on toodud raadiomajas heliülekandeks ja -salvestuseks kasutatava helikanali lihtsustatud lahterskeem. Siin näeme, et heliaparatuur on paigutatud kolme ruumi: stuudiosse, foonikasse ehk režiiruumi ja tehnilisse keskusesse.



Joon. 7.1. Helikanali lahterskeem

Stuudios toimuvad ettekanded ja seal paiknevad mikrofonid *1*, stuudio valjuhääldi *2* ning signaallambid *3*.

Diktoristuudios on kõik need seadmed koondatud diktoripulti, kus asub veel mikrofonilüliti *4*.

Stuudiost juhitakse elektrilise helisignaali pinge foonikasse, mis on toonmeistri e. helirežissööri tööruum. Seal paiknevad helikanali põhilised seadmed — mikrofonivõimendid *5*, programmivõimendid *6* ja kontrollvõimendi *7*, samuti asuvad siin individuaalmikserid *22*, peamikser *8*, impulssmeeter *9*, kontrollvaljuhääldi *10* ja sisendliinide kross *19*. Siin paiknevad ka magnetofonid *11* ja heliplaadiseadmed *20*. Foonikas on veel nn. tagasirääkimise mikrofon *12*, millega antakse käsklusi stuudiosse ja tehnilisse keskusesse. Foonikas asuvad ka magnetofonid *21* helisalvestuseks. Salvestatava helisignaali saavad need foonika väljundvõimendist.

Tehnilises keskuses asuvad sisend- ja väljundliinide ühenduskross *13* ja *14*, liinivõimendid *15*, filtrid *17*, kontrollkõlarid *16* ja impulssmeetrid *18*. Kui kanali juhtimine toimub automaatselt, siis leiduvad siin ka vastavad automaatikaseadmed.

Väikese tehnilise keskuse aparatuur on paigutatud vastavasse pulti, suures tehnilises keskuses aga pulti ja statiividele.

7.1. ELEKTROAKUSTILISTE HELIKANALITE PÕHITÜÜBID JA NENDE TASEMEDIAGRAMMID

Elektroakustilise helikanali võimendus peab olema piisav ja reguleeritav küllalt suurtes piirides, et erineva iseloomuga muusikapalade kui ka kõne ülekandel või salvestusel oleks tagatud kanali väljundis nominaalne väljundpinge. Näiteks mees põhjus-

tab tavalise tugevusega kõneldes 0,5 m kaugusel helirõhu kuni 0,2 Pa, tugevalt ja valjult kõneldes aga vastavalt helirõhu 0,6 ja 2 Pa. Naishäälel on vastavad helirõhud 0,15; 0,3 ja 0,6 Pa [48]. Suures sümfooniaorkestris võib forte ajal helirõhk olla kuni 5,8 Pa [87, 79].

Helikanali arvutamisel eeldatakse, et maksimaalne helirõhk ruumis mikrofoni(de) vahetus läheduses võib olla 0,1 ... 10 Pa. Kanali nominaalseks väljundpingeks on kas 1,55 V, 3,1 V või 5,5 V.

Ühe võimendiga helikanal koosneb mikrofonist *M*, atenuaatorist *AT* ja võimendist *V* (joonis 7.2.*a*). Kui kasutada näiteks dünaamilist mikrofoni МД-59 tundlikkusega 0,63 mV/Pa (tabel 4.1), siis mikrofoni minimaalne väljundpinge (helirõhul 0,1 Pa) on 0,063 mV ehk −83,6 dB nivoo 0,775 V suhtes. Olgu kanali nominaalseks väljundpingeks 1,55 V (+6 dB). Vajaliku võimenduse määramiseks tuleb veel arvestada, et maksimaalsele helitugevusele reguleeritud atenuaator põhjustab ikkagi veel nn. jääksumbumuse. Olgu see näiteks 26 dB. Siis võimendi võimendus peab olema

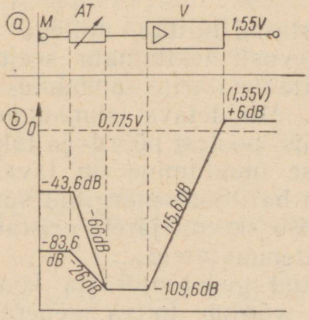
$$6-(-83{,}6)+26=115{,}6 \text{ dB},$$

millele vastab võimendustegur $K=600\,000$.

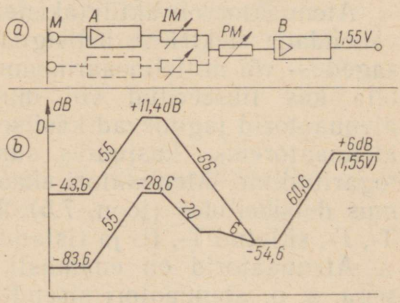
Ülevaate saamiseks helisignaali taseme kulgemisest helikanalis kasutatakse nn. tasemediagrammi, mis antud juhu jaoks on toodud joonisel 7.2.*b*.

Maksimaalse helirõhu teise äärmise väärtuse (10 Pa) puhul on mikrofoni väljundpinge 6,3 mV ehk −43,6 dB. Kanali nominaalse väljundpinge 1,55 V saamiseks tuleb atenuaatori sumbumust suurendada 40 dB võrra, seega väärtusele 26+40=66 dB, mis on ka tasemediagrammil näidatud.

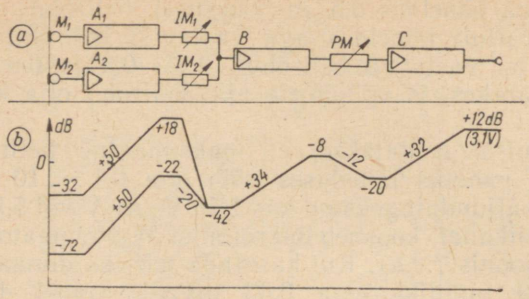
Ühe võimendiga helikanalis toimub taseme reguleerimine vahetult mikrofoni väljundis, mistõttu võimendi sisendnivoo on väga väike atenuaatori jääksumbumuse tõttu. See põhjustab kanalis



Joon. 7.2. Ühe võimendiga helikanali tasemediagramm



Joon. 7.3. Kahe võimendiga helikanali tasemediagramm



Joon. 7.4. Vahevõimendiga helikanali tasemediagramm

signaali ja müra väikese suhte ning helikvaliteedi halvenemise, mistõttu ühe võimendiga helikanalit kasutatakse vaid odavamates laiatarbeseadmeis.

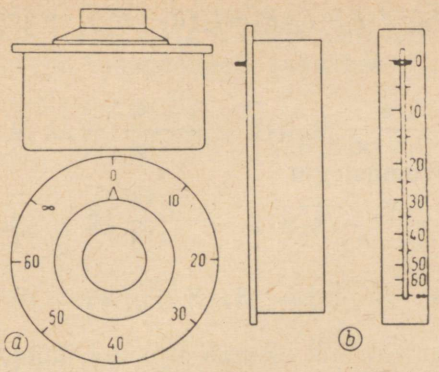
Eel- ehk mikrofonivõimendiga helikanal. Siin lülitatakse mikrofoni ja atenuaatori vahele nn. eel- e. mikrofonvõimendi *A* (joon. 7.3.*a*), mille võimendus (dB) on umbes pool vajalikust koguvõimendusest. Ülejäänud osa võimendusest annab nn. liinivõimendi *B*. Mitme mikrofoni kasutamisel reguleeritakse iga mikrofoni väljundnivood vastava nn. individuaalmikseri *IM* abil ja summasignaali nivood peamikseriga *PM*. Kanali tasemediagramm on toodud joonisel 7.3.*b*. Tänu eelvõimendeile on mikserseadme väljundis nüüd palju kõrgem pinge kui ühe võimendiga helikanali puhul, mistõttu signaali ja müra suhe ning ka helikvaliteet on parem.

Vahevõimendiga helikanal. Eriti kvaliteetse heliülekande saamiseks kasutatakse helikanalis peale mikrofoni- ja liinivõimendi veel nn. vahevõimendit, mis lülitatakse individuaal- ja peamikseri vahele (joonis 7.4.*a*). Võimendeid nimetatakse vastavalt nende järjestusele ka *A*-, *B*- ja *C*-võimendiks. Joonisel 7.4.*b* on toodud kanali tasemediagramm, kus on kasutatud mikrofoni tundlikkusega 2 mV/Pa ja väljundpingeks on 3,1 V (+12 dB).

7.2. ATENUAATORID

Atenuaator on aktiivtakisteist koostatud lülitus, millega saab vähendada elektrilise helisignaali tugevust, tekitamata seejuures sagedus- või mittelineaarmoonutusi. Atenuaatorite sumbumus võib olla kas fikseeritud või muudetav. Muudetava sumbumusega atenuaatorid jagunevad käsitsemise viisi poolest pöörd- ja lükandatenuaatoreiks, kusjuures sumbumuse muutumine on tavaliselt logaritmiline. Atenuaatori skaalale on harilikult märgitud sumbumus detsibellides (joon. 7.5). Elektrilise skeemi järele eristatakse T-, Γ-, sillatud T-, Π- ja ristandtüüpi atenuaatoreid.

Atenuaatorid on enamasti sobitatud generaatori ja koormusega, s. o. atenuaatori sisendtakistus võrdub toitva generaatori väljundtakistusega ja atenuaatori väljundtakistus võrdub koormustakistusega.



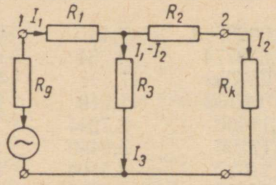
Joon. 7.5. Pöördatenuaator (*a*) ja lükandatenuaator (*b*)

Atenuaatori *sumbumusteguriks* nimetatakse suurust

$$\mathbf{K} = \sqrt{\frac{P_s}{P_v}}, \tag{7.1}$$

kus P_s ja P_v on vastavalt atenuaatori sisend- ja väljundvõimsused. Atenuaatori sumbumus D on sisend- ja väljundvõimsuste suhe detsibellides:

$$D = 10 \lg (P_s/P_v) = 10 \lg \mathbf{K}^2 = 20 \lg \mathbf{K}. \tag{7.2}$$



Joon. 7.6. T-tüüpi fikseeritud atenuaatori skeem

T-tüüpi atenuaatori skeem on toodud joonisel 7.6, kus R_1 ja R_2 on atenuaatori nn. pikitakistid ja R_3 põiktakisti. Atenuaatori sisendisse *1* on lülitatud generaator väljundtakistusega R_g ja väljundisse *2* koormustakistus R_k. Olgu atenuaatori sisendvool I_1 ja väljundvool I_2, siis võimsused

$$P_s = I_1^2 R_s, \quad P_v = I_2^2 R_k,$$

kus R_s — atenuaatori sisendtakistus. Et sobituse tõttu $R_s = R_g$, siis T-tüüpi atenuaatori sumbumustegur

$$\mathbf{K} = \sqrt{\frac{P_s}{P_v}} = \frac{I_1}{I_2}\sqrt{\frac{R_g}{R_k}} = \frac{I_1}{I_2} S, \tag{7.4}$$

kus $S = \sqrt{R_g/R_k}$ on atenuaatori nn. asümmeetrilisus. Põiktakistil R_3

kujunenud pinge avaldisest $U_{R3}=(I_1-I_2)R_3=I_2(R_2+R_k)$ on leitav voolude suhe

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{R_2+R_3+R_k}{R_3},$$

mille põhjal atenuaatori sumbumustegur

$$\mathrm{K}=\frac{R_2+R_3+R_k}{R_3}S. \tag{7.5}$$

Atenuaatori sisendtakistus

$$R_s=R_1+\frac{R_3(R_2+R_k)}{R_2+R_3+R_k}. \tag{7.6}$$

Atenuaatori väljundtakistus

$$R_v=R_2+\frac{R_3(R_1+R_g)}{R_1+R_3+R_g}. \tag{7.7}$$

Atenuaatorite arvutustabel

dB	$r=\frac{1}{\mathrm{K}}$	K	K^2	$\frac{\mathrm{K}-1}{\mathrm{K}+1}$	$\frac{\mathrm{K}+1}{\mathrm{K}-1}$	$\frac{\mathrm{K}}{\mathrm{K}^2-1}$
0,05	0,994260	1,0057731	1,011579	0,0028783	347,43	86,8618
0,5	0,94406	1,059254	1,12202	0,028774	34,754	8,6810
1,0	0,89125	1,12202	1,25893	0,057502	17,391	4,3335
1,5	0,84139	1,18850	1,41254	0,086132	11,610	2,8809
2,0	0,79433	1,25893	1,58489	0,11463	8,7241	2,1523
3,0	0,70795	1,41254	1,99526	0,17100	5,8480	1,4192
4,0	0,63096	1,58489	2,5119	0,22627	4,4194	1,0483
5,0	0,56234	1,77828	3,1623	0,28013	3,5698	0,82241
6,0	0,50119	1,99526	3,9811	0,33228	3,0095	0,66932
7,0	0,44668	2,2387	5,0119	0,38246	2,6146	0,55801
8,0	0,39811	2,5119	6,3096	0,43051	2,3228	0,47309
10,0	0,31623	3,1623	10,00	0,51950	1,9249	0,35137
12,0	0,25119	3,9811	15,849	0,59848	1,6709	0,26811
15,0	0,17783	5,6234	31,623	0,69804	1,4326	0,18363
17,0	0,14125	7,0795	50,119	0,75246	1,3290	0,14413
20,0	0,100000	10,0000	100,000	0,81818	1,2222	0,10101
22,0	0,079433	12,589	158,49	0,85282	1,1726	0,079935
25,0	0,56234	17,783	316,23	0,89352	1,1192	0,056413
27,0	0,044668	22,387	501,19	0,91448	1,0935	0,044757
30,0	0,031623	31,623	1000,0	0,93869	1,0653	0,031655
35,0	0,017783	56,234	3162,3	0,96506	1,03621	1,017788
40,0	0,0100000	100,000	10000	0,98020	1,02020	0,0100010
45,0	0,0056234	177,83	31623	0,98887	1,01131	0,0056234
50,0	0,0031623	316,23	100000	0,99370	1,00634	0,0031623
55,0	0,0017783	562,34	316230	0,99645	1,00356	0,0017783
60,0	0,0010000	1000,0	10^6	0,99800	1,00200	0,0010000
80,0	0,0010000	10000	10^8	0,99980	1,00020	0,0001000
100,0	0,0000100	10^5	10^{10}	0,99998	1,00002	0,0000100

Kui suurused R_g, R_k, $\mathbf{K}$ ja S on antud, siis sobituse puhul $R_s=R_g$, $R_v=R_k$ ja kolmest viimasest valemist koosneva võrrandisüsteemi lahendamisel saadakse:

$$R_1 = R_g \frac{\mathbf{K}^2+1}{\mathbf{K}^2-1} - 2\sqrt{R_g R_k}\,\frac{\mathbf{K}}{\mathbf{K}^2-1}, \tag{7.8}$$

$$R_2 = R_k \frac{\mathbf{K}^2+1}{\mathbf{K}^2-1} - 2\sqrt{R_g R_k}\,\frac{\mathbf{K}}{\mathbf{K}^2-1}, \tag{7.9}$$

$$R_3 = 2\sqrt{R_g R_k}\,\mathbf{K}/(\mathbf{K}^2-1). \tag{7.10}$$

Juhul kui $R_g=R_k=R_1$, siis võrrandid lihtsustuvad ja saadakse nn. sümmeetriline atenuaator, millel

$$R_1 = R_2 = R(\mathbf{K}-1)/(\mathbf{K}+1), \tag{7.11}$$

$$R_3 = 2R\mathbf{K}/(\mathbf{K}^2-1). \tag{7.12}$$

Atenuaatori arvutuse hõlbustamiseks on otstarbekas kasutada tabelit 7.1.

Tabel 7.1

$\frac{\mathbf{K}^2-1}{\mathbf{K}}=\mathbf{K}-t$	$\frac{\mathbf{K}^2+1}{\mathbf{K}^2-1}$	$\frac{\mathbf{K}-1}{\mathbf{K}}=1-r$	$\frac{\mathbf{K}}{\mathbf{K}-1}=\frac{1}{1-r}$	$\frac{1}{\mathbf{K}-1}$	dB
0,011513	173,73	0,0057395	174,22	173,22	0,05
0,11519	17,391	0,055939	17,877	16,877	0,5
0,2307	8,7237	0,10875	9,1954	8,1954	1,0
0,34711	5,8480	0,15861	6,3050	5,3050	1,5
0,46460	4,4195	0,20567	4,8620	3,8620	2,0
0,70459	3,0095	0,29205	3,4240	2,4240	3,0
0,95393	2,3229	0,36904	2,7097	1,7097	4,0
1,21594	1,9249	0,43766	2,2849	1,2849	5,0
1,494407	1,6709	0,49881	2,0048	1,0048	6,0
1,7920	1,4985	0,55332	1,80730	0,80730	7,0
2,1138	1,3767	0,60189	1,66142	0,66142	8,0
2,8561	1,2222	0,68377	1,46247	0,46247	10,0
3,7299	1,1347	0,74881	1,33545	0,33545	12,0
5,4456	1,0653	0,82217	1,21629	0,21629	15,0
6,9382	1,04071	0,85875	1,16449	0,16449	17,0
9,9000	1,02020	0,90000	1,11111	0,11111	20,0
12,510	1,01270	0,92057	1,08629	0,086291	22,0
17,727	1,00634	0,94377	1,05958	0,059584	25,0
22,343	1,00400	0,95533	1,04676	0,046757	27,0
31,591	1,00200	0,96836	1,03266	0,032655	30,0
56,216	1,00063	0,98222	1,01810	0,018105	35,0
99,990	1,00020	0,99000	1,01010	0,010101	40,0
177,83	1,00006	0,99438	1,00566	0,0056551	45,0
316,23	1,000020	0,99684	1,00317	0,0031723	50,0
562,34	1,000006	0,99822	1,00178	0,0017815	55,0
1000,0	1,000002	0,99900	1,00100	0,0010010	60,0
10000	1,000000	0,99990	1,00010	0,0001000	80,0
10^5	1,000000	0,99999	1,00001	0,0000100	100,0

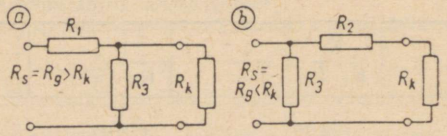
Γ-tüüpi atenuaator võimaldab sobitada kas generaatori või koormuse takistust, kuid mitte mõlemat samaaegselt. Joonisel 7.7.*a* toodud skeem on suure takistusega generaatori sobitamiseks väiksema koormustakistusega, sest sisendiga järjestikku on lülitatud takisti R_1. Takistid R_1 ja R_3 arvutatakse valemitega:

$$R_1 = R_g \frac{\mathrm{K}S - 1}{\mathrm{K}S}; \quad R_3 = R_k \frac{S}{\mathrm{K} - S}.$$

Väikese R_g sobitamiseks suurema koormustakistusega R_k kasutatakse skeemi joonisel 7.7.*b*, kus sisendit šunteerib takisti R_3. Takistid R_2 ja R_3 arvutatakse valemitega

$$R_2 = R_k(\mathrm{K}S - 1); \quad R_3 = R_g \frac{\mathrm{K}}{\mathrm{K} - S}.$$

Kui on vaja sobitada minimaalsete kadudega, tuleb skeemist joonisel 7.7.*a* lahti ühendada takisti R_3 ning R_1 arvutada seosega $R_1 = R_g - R_k$. See vastab tingimusele $\mathrm{K} = S$. Skeemis joonisel 7.7.*b* tuleb lühistada R_2, mis vastab tingimustele $R_2 = 0$, $\mathrm{K}S = 1$ ja R_3 arvutada seosest $1/R_3 = 1/R_g - 1/R_k$.



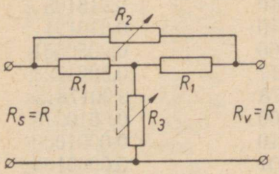
Joon. 7.7. Γ-tüüpi atenuaatori skeemid

Sillatud T-tüüpi skeemi (joonis 7.8) kasutatakse reguleeritavates atenuaatorites. Skeemi sisend- ja väljundtakistused on võrdsed ($R_s = R_v = R$), mistõttu sillatud T-tüüpi atenuaator nõuab, et generaatori väljundtakistus võrduks koormustakistusega. Viimaste erinevuse puhul tuleb nad võrdsustada vastava rööp- või jadatakisti abil. Atenuaatori takistid arvutatakse valemitega

$$R_1 = R_g = R_k = R, \tag{7.13}$$

$$R_2 = (\mathrm{K} - 1)R, \tag{7.14}$$

$$R_3 = \frac{R}{(\mathrm{K} - 1)}. \tag{7.15}$$



Joon. 7.8. Sillatud T-tüüpi reguleeritava atenuaatori skeem

П-tüüpi atenuaatorid võivad olla kas fikseeritud (joon. 7.9.*a*) või reguleeritavad (joon. 7.9.*b*). Fikseeritud П-atenuaatori takistite R_1, R_2 ja R_3 arvutusvalemid on järgmised:

$$R_1 = R_g \frac{K^2 - 1}{K^2 - 2KS + 1}, \tag{7.16}$$

$$R_2 = \frac{1}{2}\sqrt{R_g R_k}\,\frac{K^2 - 1}{K}, \tag{7.17}$$

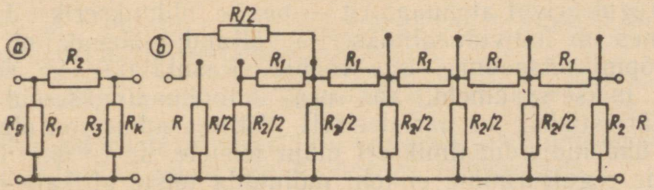
$$R_3 = R_k \frac{K^2 - 1}{K^2 - 2K/S + 1}. \tag{7.18}$$

Kui $R_g = R_k = R$, siis valemid lihtsustuvad:

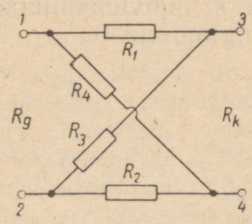
$$R_1 = R_2 = R\frac{K+1}{K-1}, \quad R_2 = \frac{R}{2}\frac{K^2-1}{K}.$$

Reguleeritav П-atenuaator ehk redelatenuaator koosneb reast П-lülidest (joon. 7.9.*b*). Kui generaatori- ja koormustakistus on võrdsed ($R_g = R_k = R$), siis

$$R_1 = R\frac{K^2-1}{2K}; \quad R_2 = R\frac{K+1}{K-1}.$$



Joon 7.9. П-tüüpi atenuaatorite skeemid



Joon. 7.10. Ristandtüüpi atenuaatori skeem

Ristandatenuaator (joonis 7.10) on kasutusel sümmeetrilise ühendusliini puhul. Takistid arvutatakse valemitega [3]:

$$R_1 = \sqrt{R_g R_h}\,\frac{(K^2-1)S + (K^2+1)\sqrt{S^2-1}}{K^2+1+2KS}, \tag{7.19}$$

$$R_2 = \sqrt{R_g R_h}\,\frac{(K^2-1)S - (K^2+1)\sqrt{S^2-1}}{K^2+1+2KS}, \tag{7.20}$$

$$R_3 = \sqrt{R_g R_h}\,\frac{(K^2-1)S - (K^2+1)\sqrt{S^2-1}}{K^2+1-2KS}, \tag{7.21}$$

$$R_4 = \sqrt{R_g R_h}\,\frac{(K^2-1)S + (K^2+1)\sqrt{S^2-1}}{K^2+1-2KS}. \tag{7.22}$$

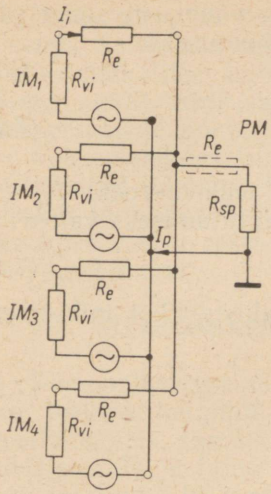
7.3. MIKSERSEADMED

Mikserseade e. segusti on atenuaatoreid sisaldav lülitus mitme heliallika signaalide liitmiseks soovitud vahekorras.

Mingi heliallika taseme reguleerimiseks ettenähtud atenuaatorit mikserseadmes nimetatakse individuaalmikseriks ja summasignaali taset reguleerivat atenuaatorit — pea- e. üldmikseriks. Jadamikserseadmes on individuaalmikserite väljundid ühendatud järjestikku, rööpmikserseadmes aga rööbiti. Kasutatakse ka segaühendusega mikserseadmeid, kus osa individuaalmiksereid on ühendatud järjestikku, osa paralleelselt. Mikserseadmes on oluline kõrvaldada ühe individuaalmikseri mõju teistele, s. t. ühe heliallika taseme reguleerimine ei tohi mõjutada teiste allikate helitasemeid peamikseri sisendis.

Rööpmikserseade. Siin ühendatakse iga individuaalmikseri väljundisse eraldustakisti R_e, et kõrvaldada individuaalmikserite mõju üksteisele (joonis 7.11). Eraldustakistid tuleb nii valida, et individuaalmikseri *IM* väljund oleks sobitatud ning peamikserit toitva ekvivalentse generaatori väljundtakistus võrduks peamikseri *PM* sisendtakistusega R_{sp}. Olgu mikserseadmes n individuaalmikserit väljundtakistusega R_{vi}; siis nende sobitustingimuseks on

$$R_{vi} = R_e + \frac{\dfrac{R_e + R_{vi}}{n-1} R_{sp}}{\dfrac{R_e + R_{vi}}{n-1} + R_{sp}}.$$



Joon. 7.11. Rööpmikserseade

Peamikseri sisendi sobitustingimus:

$$R_{sp} = \frac{\frac{R_e + R_{vi}}{n-1}(R_e + R_{vi})}{\frac{R_e + R_{vi}}{n-1} + R_e + R_{vi}} = \frac{R_e + R_{vi}}{n}.$$

Et R_{vi} ja n on ette antud, siis viimastest valemitest koostatud võrrandisüsteemi lahendamine annab [3]:

$$R_e = R_{vi}(n-1)/n; \quad R_{sp} = R_{vi}(2n-1)/n^2.$$

Kui individuaalmikserid on erinevate väljundtakistustega, tuleb need eelnevalt vastavate Γ-lülidega võrdsustada.

Tootmise ja remondi hõlbustamiseks valitakse sageli peamikser konstruktiivselt ja elektriliselt identne individuaalmikseritega. Siis $R_{vi}=R_{sp}$ ja sobitamiseks lisatakse üks eeltakisti järjestikku peamikseri sisendiga (näidatud punktiiris joonisel 7.11). Sobitustingimusteks saadakse nüüd:

$$R_e = \frac{R_{sp}(n-1)}{n+1}; \quad R_{sp} = R_{vi}.$$

Mikserreadmeis on eraldustakistite asemel sageli eraldusvõimendid ning atenuaatoreiks on potentsiomeetrid, millega reguleeritakse võimendite sisendpinget (vt. § 7.10 [84]).

Mikserseadme jääk- e. algsumbumus. Mikserseadmes tekivad võimsuskaod, sest individuaalmikseri *IM* väljundvõimsusest $P_{vi} = I_i^2 R_{vi}$ antakse vaid osa $P_{sp}=I_p^2 R_{sp}$ läbi eraldustakisti R_e peamik-

seri *PM* sisendisse (vt. joonis 7.11). Nende võimsuste suhet (dB) nimetatakse mikserseadme jääk- e. algsumbumuseks:

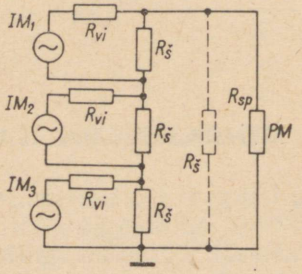
$$D_0 = 10 \log \frac{P_{vi}}{P_{sp}} = 10 \log \frac{I_i^2 R_{vi}}{I_p^2 R_{sp}}. \tag{7.23}$$

Andes ette voolu I_i ja arvutades seejuures tekkiva voolu I_p, saadakse rööpmikserseadme jääksumbumuse arvutamiseks valem

$$D_{01} = 10 \log (2n - 1), \tag{7.24}$$

kus n on individuaalmikserite arv. Võrdtakistuslikul mikserseadmel, millel $R_{vi} = R_{sp}$, on jääksumbumuseks

$$D_{02} = 10 \log n. \tag{7.25}$$



Joon. 7.12. Jadamikserseade

Jadamikserseade. Siin on individuaalmikserid *IM* ühendatud järjestikku peamikseri *PM* sisendisse (joon. 7.12). Iga individuaalmikseri väljundiga ühendatakse paralleelselt eraldustakisti $R_š$ mille takistus arvutatakse valemiga [3]

$$R_š = R_{vi} \frac{n}{n - 1}. \tag{7.26}$$

Peamikseri sisendtakistus R_{ps} peab olema suurem kui R_{vi} ja arvutatakse valemiga

$$R_{ps} = R_{vi} n^2 (2n - 1). \tag{7.27}$$

Kui kõik mikserid on valitud ühesugused, siis $R_{vi} = R_{sp}$ ja sobitamiseks tuleb ka peamikseri sisend šunteerida takistusega $R_š$ (näidatud joonisel 7.12 punktiiris). Taolise nn. võrdtakistusliku mikserseadme arvutusvalemiteks on

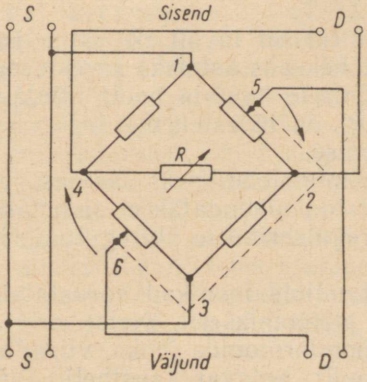
$$R_š = R_{vi} \frac{n + 1}{(n - 1)}; \quad R_{ps} = R_{vi}.$$

Jadamikserseadme puuduseks on, et maandada saab vaid ühe sisendi. Teised sisendid on vähem kaitstud häirepingete eest, mistõttu helikvaliteet kanalis halveneb. Jadamikserseadme jääksumbumus arvutatakse samade valemitega (7.24) ja (7.25) kui rööpmikserseadme puhulgi.

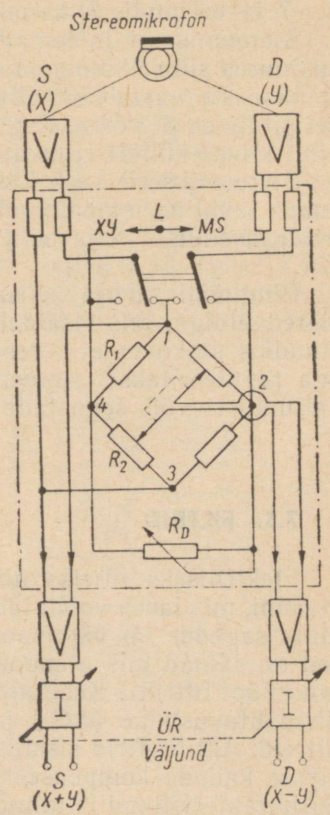
Mikserseadmes liidetavate heliallikate signaalid on üksteisest sõltumatud juhuslikud suurused, mistõttu summasignaali võimsus võrdub individuaalmikserite väljundvõimsuste summaga, kusjuures tuleb veel arvestada mikserseadme jääksumbumust ja peamikseri sumbumust.

7.4. STEREOMIKSERID

Stereomikseriga saab peale helitaseme reguleerida veel kuulaja ees tekkiva helipildi asendit kujutletava akustilise keskjoone e. tsentri suhtes, samuti ka helipildi laiust e. ulatust külgedele. Helipildi asendit ja laiust reguleeritakse eraldi regulaatoritega vastavalt joonisel 7.13 toodud skeemile, mille tööpõhimõte on järgmine.



Joon. 7.13. Stereomikseri põhimõtteskeem



Joon. 7.14. Stereomikseri skeem

Stereomikrofoni summasignaal S ja diferentsiaal- ehk vahesignaal D antakse silla *1234* erinevatele diagonaalidele, kusjuures takisti R šunteerib vahesignaali D ja seega reguleerib helipildi laiust. Liugurid *5* ja *6* on mööda silla õlgu pööratavad 360° ulatuses. Näidatud asendis on helipilt nihutatud vasakule. Pöörates liugureid 90° võrra päripäeva, saab helipildi nihutada paremale. Veel 90° võrra päripäeva pööramisel on vahesignaal D niisama suur, kui skeemil näidatud juhul, kuid faasis pööratud 180°, mistõttu kuulaja saab mulje, nagu oleks ülekantava orkestri (ansambli) parem ja vasem tiib ära vahetatud. Kui lühistada regulaator R, tõmbub helipilt kokku monofooniliseks punktiks, kusjuures liugurite asendi muutmisel liigub selle punkti asukoht helipildis kuulaja ees.

Stereomikseri täielikum skeem koos eel- ja järelvõimenditega ning helitugevuse üldregulaatoriga $ÜR$ on toodud joonisel 7.14 [101]. Sama mikser võimaldab töötada ka XY-tüüpi stereomikrofoniga (vasem ja parem kanal), mispuhul ümberlüliti L lülitatakse asendisse XY. Seejuures ühendatakse mikrofonid X ja Y silla naaberõlgadele R_1 ja R_2, mistõttu väljundis S saadakse kanalite summa $X+Y$ ja väljundis D kanalite vahe $X-Y$.

Stereomikseri mõlemad regulaatorid on tavaliselt astmelised, kusjuures silla üks õlg jaotatakse kaheksaks astmeks arvestusega, et üks aste vastab heliallika nihkumisele kuulaja poolt tajutavas helipildis ca 3° võrra. Regulaatoril R_D on 15 astet, mis tagab helipildi laiuse küllalt sujuva reguleerimise.

Stereomikserit saab kasutada ka monofooniliseks saateks, mispuhul tavaline, monofooniline mikrofon ühendatakse summasignaali sisendisse S ja helitugevust reguleeritakse üldregulaatoriga $ÜR$.

Ringhäälingu- ja helisalvestusstuudiote foonikad varustatakse stereopuldiga, mis sisaldab kuni 5 stereomikserit. Neist neli on stuudios paiknevate stereo- või monomikrofonide jaoks, viiendaga aga reguleeritakse stereomagnetofonilt antavat taustheli. Puldi väljundisse võib segustada veel tehiskaja.

7.5. FILTRID

Elektriliseks filtriks nimetatakse passiivset või aktiivset neliklemmi, mis laseb voolu läbi teatud sagedusribas ja tõkestab voolu, mille sagedus on väljaspool seda sagedusriba. Filtrite põhilülitused on samad mis atenuaatoritelgi (T-, Γ-, sillatud T-, Π- ja ristandtüüpi filtrid). Kasutatavate elementide järgi eristatakse induktiivmahtuvuslikke (*LC*-) ja takistusmahtuvuslikke (*RC*-) passiivfiltreid. Aktiivfiltrid sisaldavad veel võimendusseadiseid filtris tekkivate kadude kompenseerimiseks. Filtreid iseloomustavad sageduskarakteristikud ja tunnustakistused.

Helitehnikas kasutatakse filtreid:

1) kõrgete ja madalate helisageduste eraldamiseks nende eraldi võimendamisel ja/või taasestamisel;

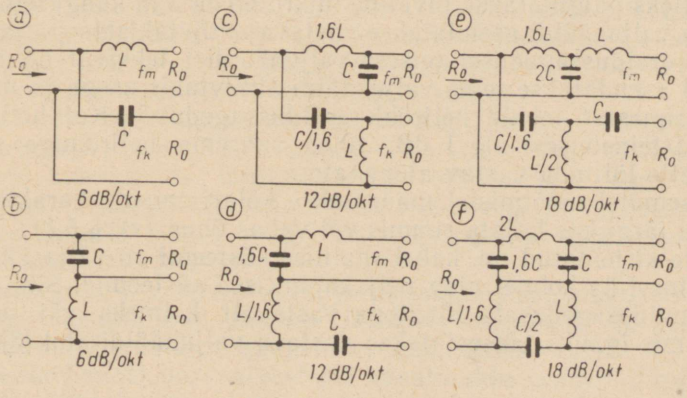
2) kitsaribaliste häirete kõrvaldamiseks helisignaalist;

3) sagedusmoonutuste vähendamiseks või kõrvaldamiseks moonutatud spektriga helisignaali puhul;

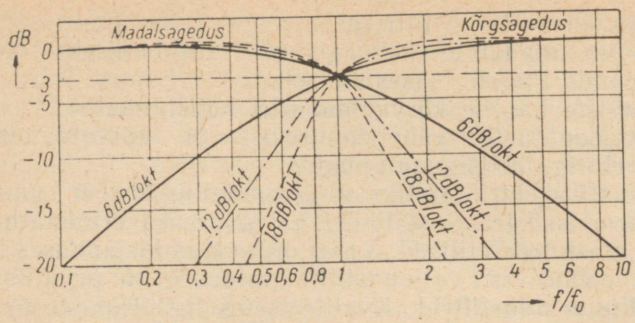
4) helisignaali spektri tahtlikuks moonutamiseks, et suurendada helivõimendussüsteemi stabiilsust, või muuks eriotstarbeks.

Filtrite arvutuse teoreetilised alused on toodud kirjanduses [28]. Järgnevalt on toodud vaid valjuhääldite eraldusfiltrite arvutus.

Valjuhääldite eraldusfiltrid. Kvaliteetsetes heliülekandesüsteemides kasutatakse kõrgete ja madalate helisageduste taasestamiseks eri valjuhääldeid (vt. § 5.3 ja 5.6), mida toidetakse kas ühisest või ka eri võimsusvõimenditest. Ühise võimendi puhul lülitatakse selle väljundisse eraldusfiltrid (joonis 7.15) kõrgete (f_k) ja madalate (f_m) helisageduste eraldamiseks ja vastavatesse valjuhääldites juhtimiseks. Filtrite sageduskarakteristikud on toodud joonisel 7.16. Lihtsatel skeemidel (joonis 7.15.*a* ja *b*) on sageduskarakteristiku kalle tõkkepiirkonnas 6 dB oktaavi kohta, keerukamatel skeemidel kas 12 või 18 dB oktaavi kohta. Suurema kaldega filtrite puuduseks on võimalikud moonutused siirdeprotsessides ja kallim hind. Kuid suurema kalde puhul on ülemineku piirkond ühelt valjuhäälditelt teisele kitsam ja ebasoovitavad akustilised interferentsinähtused valjuhääldite vahel nõrgemad. Sagedust f_0, kus toimub üleminek ühelt valjuhäälditelt teisele, nimetatakse eraldussageduseks e. sageduslahkmeks. Kumbki valjuhäälti peab andma sellel sagedusel poole oma akustilisest nimivõimsusest (et summaarne võimsus oleks konstantne), seepärast peab filtrite sageduskarakteristikutel olema eraldussagedusel langus 3 dB (joon. 7.16). Eraldussagedus valitakse valjuhääldite sageduskarakteristikute kattuvate osade keskele. Kõige lihtsamate filtrite (joon. 7.15.*a* ja *b*)



Joon. 7.15. Valjuhäälditе eraldusfiltrite skeeme



Joon. 7.16. Eraldusfiltrite sageduskarakteristikud

elementide L ja C väärtused arvutatakse tingimusest, et eraldussagedusel võrduks L ja C näivtakistus valjuhääldite takistusega R_0:

$$2\pi f_0 L = R_0; \quad \frac{1}{(2\pi f_0 C)} = R_0. \tag{7.28}$$

Keerukamate filtrite elemendid on arvutatud filtrite teooria põhjal ja nende elementide väärtused (lihtsate filtrite vastavate elementide suhtes) on antud joonistel 7.15.*c* . . . *f* [3].

Et kõrgete helisageduste valjuhääldi kasutegur on suurem (eriti ruuporvaljuhääldil), kasutatakse sama helirõhu saamiseks kõrgetel helisagedustel suurematakistusliku võnkepooliga valjuhääldit. Filtrite arvutusel vajalik R_0 valitakse nüüd valjuhääldite takistuste aritmeetiline keskmine või võrdne madalamate helisageduste valjuhääldi takistusega.

Süsteemi kvaliteeti saab ligikaudselt kontrollida tavalises ruumis. Selleks paigutatakse tavaline mikrofon ca 3 m kaugusele kõlarist, üks valjuhääldi asendatakse vastava aktiivtakistusega ja mõõdetakse eraldussagedusel teisest valjuhääldist tekkivat helirõhku. Seejärel asendatakse teine valjuhääldi aktiivtakistusega ja mõõdetakse esimesest tekkiv helirõhk eraldussagedusel. Kui helirõhud erinevad teineteisest üle 1 dB, tuleb suurema helirõhuga valjuhääldi ette lülitada vastav atenuaator.

Täpsematel mõõtmistel määratakse kõlari sageduskarakteristik helirõhu järgi kas kajata ruumis või vabas õhus (vt. § 5.1).

Peale kirjeldatud nn. kahekanalilise süsteemi on välja töötatud ja kasutusel ka kolme- ning neljakanalilised süsteemid. Siin jaotatakse kuuldesagedusala filtritega vastavalt kolmeks või neljaks ribaks, mis igaüks taasestatakse vastava valjuhääldi abil [3].

7.6. MIKROFONIDE PAIGUTUSEST

Kuulates heliülekannet või -salvestust tekib kuulajal mingi ettekujutus nii esinejate kui ka üksikute muusikariistade või pillirühmade kaugusest mikrofonist ja omavahelisest paigutusest. Seda nimetataksegi helipildiks. Võiks arvata, et kuulajaile tundub, nagu paikneksid valjumad heliallikad eespool, kuulajale lähemal, ja tasasemad, nõrgemad heliallikad tagapool, kaugemal. Ometi näitavad vastavad uurimused [79], et heliallikas näib helipildis paiknevat seda lähemal kuulajale, mida suurem on otse- ja peegeldunud heli suhe. Kui mingi heliallikas (esineja või muusikariist) kaugeneb mikrofonist, nõrgeneb otseheli ja suureneb peegeldunud heli osatähtsus. See annabki kuulajale mulje, et heliallikas kaugeneb; suhteliselt tugevnev peegeldunud heli toob kuulajale nüüd rohkem informatsiooni ka ruumi kohta, millest toimub heliülekanne: ruumi kõlavus ja kaja annavad ettekujutuse ruumi iseloomust ja suurusest. Täpsemate katsete ja mõõtmiste põhjal on selgunud, et heliallika kaugus kuulaja poolt tajutavas helipildis on optimaalne, kui otse- ja peegeldunud heli suhe $G=1$. See suhe on arvutatav valemiga [79]

$$G = \frac{13{,}8V}{4\pi c d^2 T}, \tag{7.29}$$

kus V ja T on vastavalt ruumi maht ja reverberatsiooniaeg ning d — mikrofoni kaugus heliallikast. Pannes viimases valemis $G=1$, saadakse mitmesuguste ruumimahtude ja reverberatsiooniaegade puhul järgmised mikrofoni optimaalsed kaugused heliallikast:

V, m³	100	500	1000	5000
T, s	0,8	1,0	1,1	1,3
d_{opt}, m	0,25	0,63	1,9	3,5

Need kaugused kehtivad suunata e. ringkarakteristikuga mikrofoni puhul. Kardioid- või koosinusoidkarakteristikuga mikrofoni puhul, kui mikrofon on suunatud heliallika poole, on optimaalne kaugus ülaltoodust umbes kolm korda suurem.

Kui mikrofoni kaugus heliallikast $d \leqslant 0{,}5d_{opt}$, siis $G \geqslant 2$ ja kuulajale tundub, et heliallika mõõtmed on suurenenud. Analoogiliselt foto- ja kinotehnika terminoloogiale nimetatakse seda suureks plaaniks. Esineja hääl tundub siis ligidasena ja intiimsena ning mitmed muusikariistad, nagu klarnet, truba ja tromboon saavad omapärase, meeldiva kõla.

Kui $d \geqslant 1{,}5d_{opt}$, siis $G \leqslant 0{,}5$ ja heliallika näiv asukoht helipildis taandub tagaplaanile, hakkab prevaleerima ruumi kõlavus ning kaja. Seda nimetatakse kaugeks e. üldplaaniks.

Heliülekandel või -salvestusel kasutatakse mitut mikrofoni siis, kui ühe mikrofoniga osutub võimatuks haarata kõiki esinejaid ja muusikariistu või pillirühmi nii, et nende paiknemine helipildis

tagaks maksimaalse emotsionaalsuse. Mikrofonid paigutatakse vastavatest heliallikatest (esinejatest, muusikariistadest või pillirühmadest) sellisele kaugusele, mis tagaks heliallikate soovitud asendi helipildis. Iga mikrofoni asend täpsustatakse katseliselt kuulmise abil, kusjuures vastava individuaalmikseriga reguleeritakse iga heliallika helitugevus soovitud tasakaalu ülejäänutega. Täpsemad juhised vajalike mikrofonide arvu ja nende paigutuse kohta on toodud kirjanduses [79].

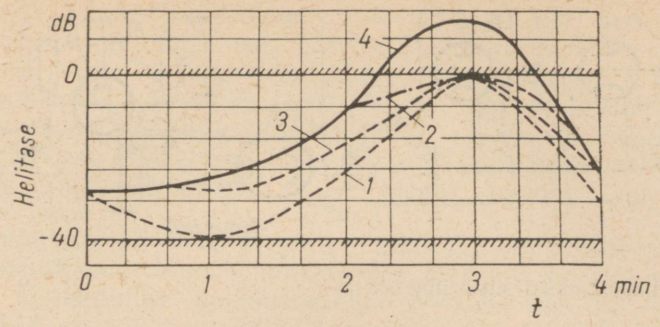
7.7. HELISIGNAALI REGULEERIMINE JA KONTROLLIMINE

Kui salvestatava või ülekantava muusikapala dünaamikapiirkond (vt. § 1.7) ületab maksimaalselt lubatava väärtuse, milleks on 40 dB, tuleb seda ahendada piaano tugevdamise ja forte nõrgendamisega. Inimkõrv otsustab valjuse üle põhiliselt võrdlemise teel ja absoluutse valjuse määramisel osutub üsna ebatäpseks. Kõrv on lühiajalise mäluga. Ühtlase tugevusega muusikapala helitugevust võib aeglaselt vähendada, ilma et seda märgataks, kuid helitugevuse kiire muutumine on kohe märgatav. Selle nähtuse ärakasutamisel põhinebki helisignaali reguleerimine, kus piaano lähenemisel helitaset aeglaselt suurendatakse, nii et see ei lange allapoole minimaalset lubatavat nivood (−40 dB), ning läheneva forte, eriti aga forte fortissimo nõrgendamist alustatakse küllalt varakult, et varuda helitugevusele n.-ö. kasvuruumi ja jätta kuulajale helitugevuse pideva suurenemise mulje (joonis 7.17).

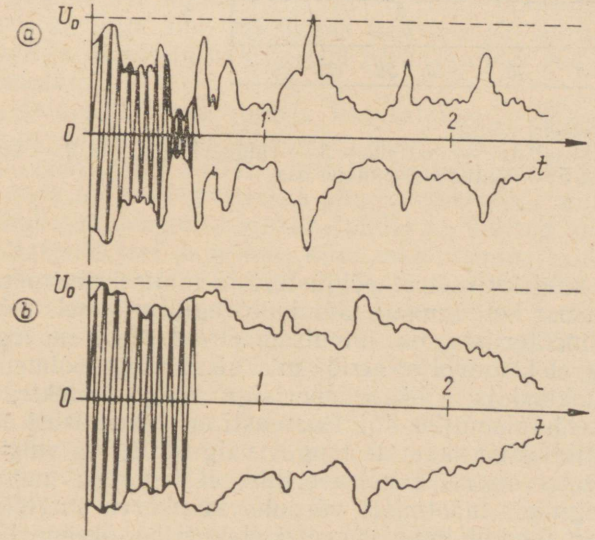
Maksimaalselt lubatava nivoo ehk nn. täisnivoo (0 dB) ületamine helikanali väljundis on lubamatu, sest see põhjustaks tarbijais (saatja, helisalvestusseade, võimsusvõimendi jms.) suure mittelineaarmoonutuse tekkimise ja helikvaliteedi tunduva halvenemise. Helikanali täisnivooks on tavaliselt kas 1,55; 3,1 või 5,5 V.

Minimaalseks lubatavaks nivooks on valitud −40 dB [114], sest praegusaegse aparatuuri omamürad pole siis piaano ajal veel kuuldavad ega vähenda heliülekande loomutruudust.

Kõne või löökpillide (trumm, ksülofon, klaver jms.) heli ostsillogrammist on näha, et heli koosneb paljudest lühikese kestusega impulssidest, mille täitesagedusteks on tooni kõrgusele vastav põhisagedus ja selle kõrgemad harmoonilised (joon. 7.18.*a*). Keel- ja puhkpillide helis on impulsid pikema kestusega ning väiksemad, heli on ühtlasema tugevusega (joon. 7.18.*b*). Kui mõlema helisignaali tippväärtused reguleerida ulatuma helikanali täisnivooni U_0, on esimese (impulsilise heli) keskmine võimsus palju väiksem kui teisel ja ka saatja keskmine modulatsioonisügavus vastavalt väiksem ning kuuldavus halvem. Praktika näitab, et helisignaali nivoo reguleerimisel võivad lühiajalised (kestusega kuni 10 ms) tipud ületada täisnivoo U_0 väärtuse. Seejuures tekkiv ülemodulatsioon ja

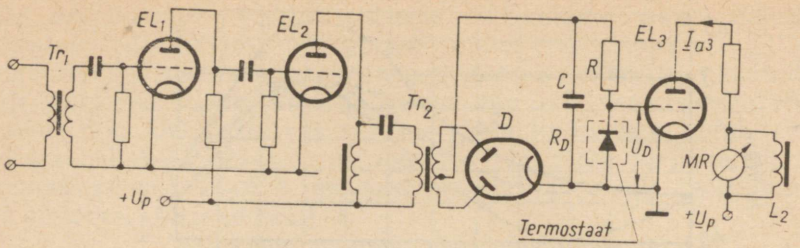


Joon. 7.17. Helitaseme õige (*1*) ja väär (*2*, *3*) reguleerimine (*4* — reguleerimata helitase)

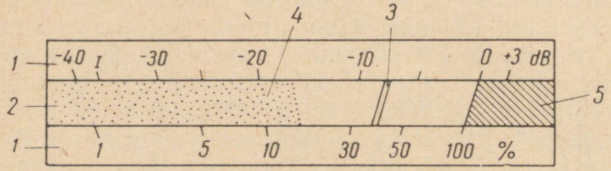


Joon. 7.18. Helisignaalide ostsillogrammid:
a — kõne ja löökpillid, *b* — keel- ja puhkpillid

mittelineaarmoonutus pole impulsside lühikese kestuse tõttu kuuldavad ega põhjusta helikvaliteedi halvenemist. Lubades lühiajalistel tippudel ületada täisnivood, suureneb helisignaali keskmine võimsus ja ka saatja kuuldavus paraneb, mis mitmekordselt kompenseerib lühiajalisest ülemodulatsioonist tekkiva võimaliku helikvaliteedi halvenemise.



Joon. 7.19. Impulssmeetri elektriline skeem



Joon. 7.20. Impulssmeetri näitur:
1 — logaritmilised skaalad, *2* — mattklaas, *3* — valgusviida näidik, *4* — keskväärtuse tulpnäidik, *5* — mattklaasi punane osa

Et kõrvaldada subjektiivsetest põhjustest ja maitseerinevustest tingitud ebamäärasust helisignaali täisnivoo reguleerimisel, kasutatakse selleks erimõõteriistu, nn. impulssmeetreid. Need on logaritmilise skaalaga elektronvoltmeetrid, mis sisaldavad võimendi, mõõtealaldi e. detektori ja väikese inertsiga magnetoelektrilise pöördpool-mõõtemehhanismi [29, 45]. Enamasti on selles osuti asemel näidikuks mattklaasist skaalale langev valguskiir, nn. valgusnäidik. Impulssmeeter on nii konstrueeritud, et tema kui mõõteriista inerts helisignaali mõõtmisel võrduks inimkõrva inertsiga.

Joonisel 7.19 on toodud impulssmeetri elektriline skeem [87]. Kontrollitav helisignaal antakse siin läbi eraldustrafo Tr_1 kaheastmelise madalsagedusvõimendi (EL_1 ja EL_2) sisendisse. Võimendatud signaal detekteeritakse täisperioodalaldiga (kaksikdiood D). Detektori koormuseks on takisti R ja pooljuhtventiili R_D jadalülitus. Takistil R_D kujunev pinge U_D tüürib trioodi EL_3, mis töötab oma karakteristiku lineaarsel osal ja mille anoodahelasse on lülitatud valgusnäidiku pöördpool-mõõtemehhanism MR. Impulssmeetril on logaritmiline skaala (joon. 7.20) tänu ventiili R_D eksponentsiaalsele pinge-voolu karakteristikule [8].

Vastavalt rahvusvahelisele kokkuleppele [114] kontrollitakse impulssmeetreid nelinurkimpulssidega, mille täitesageduseks on

1000 Hz ja amplituud vastab täisnivoole (0 dB). Impulsi kestuse 3, 5 või 10 ms puhul peab mõõteriista hälve olema vastavalt −4, −2 või 0 dB. Pikkade impulssidega (kestusega 0,5 s või kauem) kontrollitakse hälbe viiteaega. See on aeg, mille jooksul valgusnäidik jõuab oma algasendist näiduni −1 dB. Viiteaeg ei tohi ületada 300 ms. Hälbe tagastumisaeg (s. t. aeg, mille jooksul valgusnäidik liigub täishälbelt 0 dB tagasi nivoole −40 dB) olgu 1,5 . . . 2 s.

Impulssmeetri reageerimine lühikestele impulssidele on määratud pöördpool-mõõtemehhanismi *MR* inertsiga ja detektori mahtuvuse *C* laadimise ajakonstandiga $\tau_l = CR_i$, kus R_i — detektordioodi *D* sisetakistus. Hälbe tagastumisaja määrab põhiliselt kondensaatori *C* tühjenemine läbi järjestikku lülitatud takistuste *R* ja R_D, mis toimub ajakonstandiga $\tau_t = C(R+R_D)$.

Enne saate või helisalvestuse algust kalibreeritakse impulssmeeter helipuldi etalongeneraatorist saadava täisnivoole vastava helisagedusliku (400 või 1000 Hz) pingega.

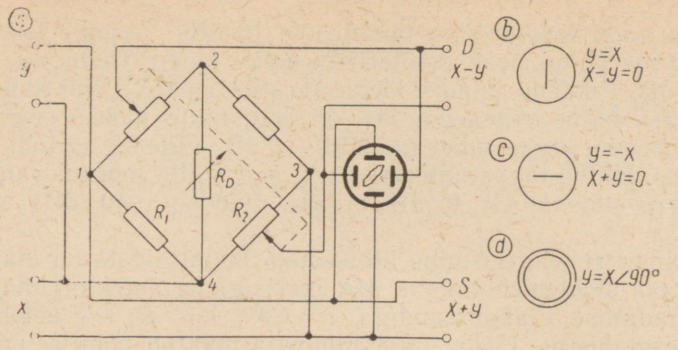
Tavalise osutimõõteriista (testri jms.) pöördmehhanismi inerts on selleks liiga suur, et mõõta helisignaali tippväärtust vajaliku täpsusega. Seetõttu kvaliteetsel heliülekandel või -salvestusel neid ei kasutata.

Laiatarbe-heliaparatuuris kasutatakse impulssmeetris valgusviidaga pöördpool-mõõtemehhanismi asemel elektronindikaatorlampi (näit. tüüp 6E1П), mis on hinnalt märksa odavam. Lambi trioodosa tüürvõrele antakse pinge detektorist, mille kondensaatori laadimise-tühjenemise ajakonstandid on valitud nii, et saada lambi indikaatorsektori vajalikult kiire rakendumine ja suhteliselt aeglasem tagastumine vastavalt ülaltoodud normidele.

Helikanali väljundsignaali reguleerimise ja kontrollimise hõlbustamiseks on välja töötatud ning ringhäälingus kasutusel impulssmeetrite kombineeritud näitureid, mille mattklaasil peale impulssmeetri helendava näidiku *3* (vt. joon. 7.20) liigub väiksema heledusega nn. tulpnäidik *4*. Viimase ulatus skaalal võrdub helisignaali keskväärtusega, s. t. saatja keskmise modulatsioonisügavusega. Mattklaasi parempoolne osa *5* on punane, et juhtida tähelepanu ülemodulatsioonile.

Kinotehnikas kasutatakse impulssmeetreid neoonlampnäituriga, kus ridamisi paigutatud neoonlambid süttivad üksteise järel vastavalt helisignaali tugevusele [87, 79].

Stereofoonilise helisignaali kontrollimine ostsilloskoobiga. Stereofoonilise heliülekande puhul on summa- ja vahesignaali suurust ning nende omavahelist vahekorda otstarbekas kontrollida elektronostsilloskoobiga, mille vertikaalhälvitusplaatidele antakse summasignaal $S=X+Y$ ja horisontaalhälvitusplaatidele vahesignaal e. diferentssignaal $D=X-Y$ (joonis 7.21.*a*). Ostsilloskoobi ekraanil tekkiva kujutise ulatus vertikaalsihis annab nüüd ettekujutuse summasignaali suurusest, kujutise ulatus horisontaalsihis aga diferentssignaali suurusest.

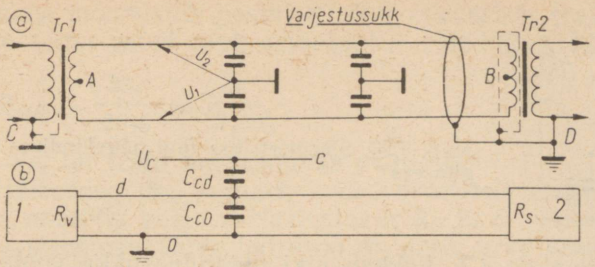


Joon. 7.21. Stereosignaali ja -kanali kontrollimine ostsilloskoobiga

Lülitus võimaldab kontrollida ka stereofoonilise helikanali enda korrasolekut, kaasa arvatud stereomikrofon. Selleks paigutatakse mikrofoni ette heligeneraatorist toidetav valjuhääldi. Kui viimane asub täpselt mikrofoni akustilisel teljel, on vasaku ja parema kanali signaalid ühesuurused ning faasis, s. t. $Y=X$. Diferentssignaal on null ja ostsilloskoobi ekraanile tekib vertikaalsirge (joon. 7.21.*b*). Kui sirge asemel saadakse ellips, osutab see mikrofonis või võimendeis tekkivatele parasiitsetele faasinihetele, mis tuleb kõrvaldada. Muutes valjuhääldit toitva heligeneraatori sagedust, kontrollitakse stereokanali korrasolekut kogu ülekantavas sageduspiirkonnas.

7.8. SÜMMEETRILINE JA EBASÜMMEETRILINE LIIN. VARJESTAMINE JA MAANDAMINE HELITEHNIKAS

Kuigi helikanali eri seadmete (mikrofonide, eel- ja lõppvõimendite, mikserseadmete jne.) vaheliste ühendusjuhtmete pikkus võib küündida kümneisse meetreisse, on see siiski märksa lühem kui ülekantava signaali lainepikkus. Seetõttu langeb ära terve rida pikkadele ühendusliinidele omaseid probleeme, nagu liini sobitamine, laine peegeldumine liinis jne. Ühendusjuhtmed helikanalis on aga küllalt pikad selleks, et neis võib indutseeruda häirepinge toitevõrgust või naaberkanalist. Seetõttu väheneb signaali ja müra suhe kanalis ning halveneb heliülekande kvaliteet. Häirete sissetungimise vältimiseks kasutatakse ühendusliinideks sümmeetrilist kahejuhtmelist varjestatud kaablit, mille varjestussukk maandatakse. Häirepinge võib tungida helikanalisse ka siis, kui mikrofonide, võimendite ja mikserseadmete korpused pole õigesti maandatud. Järgnevalt ongi lähemalt vaadeldud sümmetreerimise, varjestamise ja maandamise probleeme helitehnikas.



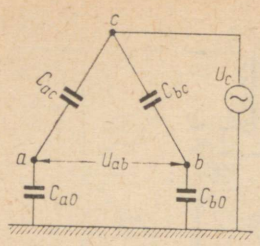
Joon. 7.22. Sümmeetriline (*a*) ja ebasümmeetriline (*b*) liin

Sümmeetriline ja ebasümmeetriline ühendusliin. *Sümmeetriline ühendusliin* on kahejuhtmeline liin, mille juhtmetes on pinged võrdsed, kuid vastandfaasilised. Sümmeetria saavutatakse trafo ühendamisega liini algusesse ja lõppu (joon. 7.22.*a*). Trafo mähiste keskpunktide *A* ja *B* maandamine pole vajalik ja on isegi ebasoovitav. Kui ühe juhtme mahtuvus maa suhtes on niisama suur kui teiselgi, siis tekkiva mahtuvusliku pingejaguri tõttu kujunevadki juhtmete pinged U_1 ja U_2 võrdseteks ning vastandfaasilisteks. Kui mahtuvused on ebasümmeetrilised, pole pinged võrdsed, kuid mähise keskpunkti maandamine põhjustaks juhtmetes ebavõrdsed mahtuvuslikud voolud, millest tekkiv ebasümmeetria häiriks veel rohkem seadme tööd. Mingil juhul ei tohi mõlemaid keskpunkte maandada, sest erinevate maanduspunktide vaheline parasiitpinge põhjustab läbi juhtmete tasandusvoolu ja viimasest võivad tekkida suured häirepinged juhtmete paratamatu ebasümmeetrilisuse tõttu.

Ebasümmeetrilisel ühendusliinil on üks juhtmetest maandatud (joon. 7.22.*b*). Siin on välishäirete sissetungimise oht palju suurem kui sümmeetrilise liini puhul. Olgu näiteks juhtme *d* mahtuvus maa suhtes C_{c0} ja paiknegu liini vahetus läheduses kolmas juhe *c* häirepingega U_c. Siis läbi mahtuvuse C_{cd} kandub liinijuhtmesse *d* häirepinge, mille suurus arvutatakse kujuneva mahtuvusliku pingejaguri $C_{cd}C_{c0}$ ülekandeteguri abil, võttes arvesse liini toitva pinge allika *1* väljundtakistuse R_v ja koormuse *2* sisendtakistuse R_s šunteerivat mõju.

Sümmeetriline liin on palju häirekindlam, mis selgub järgmisest. Olgu häirepingega U_c juhtme *c* mahtuvus sümmeetrilise liini juhtmete *a* ja *b* suhtes vastavalt C_{ac} ja C_{bc} (joon. 7.23), liinijuhtmete *a* ja *b* mahtuvused maa suhtes aga vastavalt C_{a0} ja C_{b0}. Kirjeldatud neljast mahtuvusest kujunev sild on tasakaalus, kui $C_{ac}=C_{bc}$ ja $C_{a0}=C_{b0}$ ning häirepinge U_{ab} juhtmete *a* ja *b* vahel kui pinge silla diagonaalis on null.

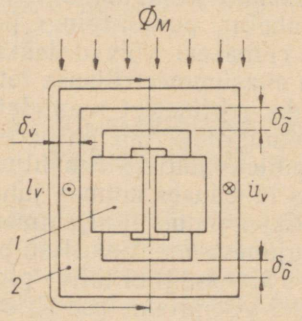
Ühenduskaabli varjestussukka (vt. joon. 7.22) tohib maandada vaid ühes punktis; kaabli ühes otsas. Suurema häirekindluse annab tavaliselt maandamine tarbijapoolses otsas. Kui sukk maandada



Joon. 7.23. Sümmeetrilise liini häirekindluse selgituseks

ka teises otsas (punktis *C*), hakkab piki maandussukka voolama punktide *C* ja *D* vahelisest parasiitpingetest tingitud tasandusvool ning kaablisoontes indutseerub häirepinge. Samal põhjusel ei tohi varjestussukal kogu kaabli pikkusel olla juhuslikke puutemaandusi, milleks juba kaabli valmistamisel sukk ümbritsetakse isolatsioonikihiga. Kasutatavamad varjestatud kaabli tüübid on КММ, МРГПЭ, ПАДЭ, ПКЗ jt., mille kohta lähemaid andmeid saab vastavatest kataloogidest ja kirjandusest [80].

Elektrostaatilised ja elektromagnetilised varjed. *Elektrostaatiline varjestamine* on seadme kaitsmine välise elektrivälja eest. Siin piisab õhukesest metallfooliumist või tihedast traatvõrgust. Varje peab olema aga hästi maandatud. Elektrostaatiline varje paigutatakse näiteks trafo primaar- ja sekundaarmähise vahele (vt. Tr_1 joonisel 7.22.*a*) või ümbritsetakse üks mähistest alumiiniumfooliumiga, mis maandatakse (vt. Tr_2 joonisel 7.22.*a*). Seejuures tuleb jälgida, et varje ei moodustaks trafol lühiskeerdu.



Joon. 7.24. Trafo *1* magnetilises varjes *2* ($\ddot{u}_v$ — varje ümbermõõt risti magnetvooga)

Magnetiline varjestamine on varjestamine väliste magnetväljade eest ning raskemini läbiviidav. Selleks paigutatakse varjestatav objekt, näit. trafo, suure magnetilise läbitavusega materjalist karpi (joon. 7.24). Tõhusaks toimeks peab varje enda magnetiline takistus [134]

$$R_{MV} = \frac{l_v}{\delta_v \ddot{u}_v \mu_v}$$

olema palju väiksem varje sisemuse magnetilisest takistusest R_{MS}.

Viimane moodustub peamiselt õhuvahedest $\delta_õ$ trafo magnetlikke ja varje seina vahel ning arvutatakse valemiga [134]

$$R_{MS} = \frac{2\delta_õ}{2S_{Fe}} = \frac{\delta_õ}{S_{Fe}},$$

kus S_{Fe} on trafo magnetahela ristlõige.

Häirevoog Φ_M jaguneb pöördvõrdeliselt magnetiliste takistustega, mistõttu varje varjestustegur β_v, s. o. välise häirevoo Φ_M ja varje sisemust läbiva häirevoo Φ_s suhe, arvutatakse valemiga

$$\beta_v = \frac{\Phi_M}{\Phi_S} = 1 + \frac{R_{MS}}{R_{MV}} = \mu_v \frac{\delta_v ü_v \delta_õ}{l_v S_{Fe}}.$$

Varjestusteguri suurendamiseks tuleb kasutada suure algläbitavusega μ_v materjali, näit. permalloid. Kui 3 mm paksusest lehtrauast varjel on näiteks $\beta_v = 4$, siis samasugusel permalloist varjel paksusega $\delta_v = 0{,}35$ mm saadakse $\beta_v = 17$. Varjestustegur suureneb võrdeliselt varje seina paksusega.

Kui ümbritseda trafo kahe varjega, on üldine varjestustegur kummagi varje varjestustegurite korrutis: $\beta_v = \beta_{v1}\,\beta_{v2}$. Seepärast on kaks eraldi varjet efektiivsem kui üks, kahekordse seinapaksusega varje.

Permalloivarje puuduseks on varjestusteguri vähenemine ta kiire küllastumise tõttu tugevates väljades. Seepärast tehakse väline varje rauast, sisemine permalloist.

Sageduse suurenemisel permalloi läbitavus samuti väheneb, sest pöörisvoolude tõttu tõrjutakse magnetvoog materjali pinnale. Näiteks sagedusel 200 Hz on 1 mm paksuse permalloipleki läbitavus 5-kordselt vähenenud. Seepärast kasutatakse keskmiste ja kõrgete helisageduste jaoks alumiinium- või vaskvarjeid. Väline magnetväli indutseerib siin varjes pöörisvoolud. Viimaste magnetväli on välisele väljale vastassuunaline ning takistab häirevälja tungimist varje sisemusse. Efektiivseks varjestamiseks peab varje seina paksus 2 ... 3 korda ületama pöörisvoolude sissetungimissügavuse ε_p:

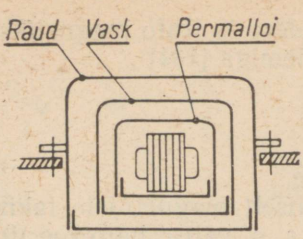
$$\delta_v = (2 \ldots 3)\varepsilon_p = (2 \ldots 3) \cdot 50{,}33 \sqrt{\frac{\varrho}{\mu_v f}} \text{ cm},$$

kus ϱ — materjali eritakistus $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, μ_v — suhteline magnetiline läbitavus; f — sagedus Hz. Vase puhul $\varepsilon_p = 66{,}2/\sqrt{f}$ mm ja näiteks sagedusel $f = 1600$ Hz on sissetungimissügavus $\varepsilon_p = 66{,}2 : \sqrt{1600} = 1{,}6$ mm.

Sellise, nn. *juhtiva varje* varjestustegur [129]

$$\beta_v = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \frac{r}{\varepsilon_p} e^{\delta_v/\varepsilon_p},$$

kus r on varjega sama ruumalaga kere raadius. Vaskvarje paigu-



Joon. 7.25. Trafo kolmekordses varjes

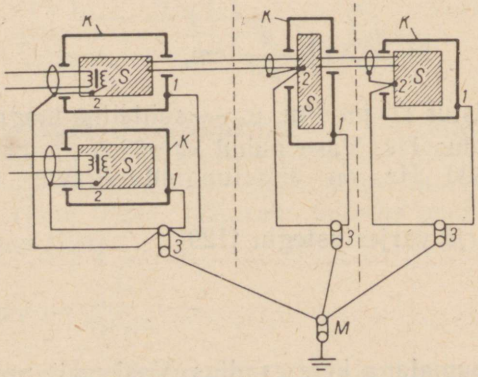
tatakse raud- ja permalloivarje vahele, nagu näidatud joonisel 7.25, mispuhul saadakse varjestustegur $\beta_v = 60 \ldots 80$ dB kogu helisagedusribas [87, 129].

Trafo häirekindluse suurendamiseks on otstarbekohane manteltrafo asemel kasutada kahe sambaga trafot (vt. joon. 7.24). Kummalegi sambale tuleb kerida pool primaar- ja sekundaarmähist. Suur häirekindlus saavutatakse siis sellega, et mähised, mis trafo kasuliku mangetvoo suhtes on ühendatud järjestikku, osutuvad häirevoo suhtes lülitatuks vastassuunaliselt ning vastassuunalised on ka mähistes indutseeritud häirepinged.

Eriti olulised on varjestusküsimused magnetofonide juures (vt. 8. ptk.), kus taasestuspead ja taasestusvõimendi sisendtrafo tuleb kaitsta lindiveomootori tugeva häirevälja eest. Ülaltoodust selgub veel, et mikrofonikaabli vasktraadist varjestussukk toimib madalatel ja keskmistel helisagedustel elektrostaatilise varjena, kuid kõrgematel helisagedustel ka elektromagnetilise varjena.

Helitehniliste seadmete maandamine on vajalik nii teenindava personali ohutuse tagamiseks [14] kui ka häirepingete helikanalisse sissetungimise vältimiseks.

Maandamine on skemaatiliselt kujutatud joonisel 7.26. Seadmete metallkorpused *K* on isoleeritud lülitusest *S*. Lähestikku paiknevate või mingit omaette konstruktiivset tervikut (pult, statiiv vms.) moodustavate seadmete korpuste maandusklemmid *1* ühendatakse vastava puldi või statiivi maandusklemmiga *3*, kuhu ühen-



Joon. 7.26. Helitehniliste seadmete maandamine

datakse ka lülituste maandusklemmid *2*. Taoline nn. ühepunktimaandus väldib parasiitvoolude tekkimise maandusjuhtmetes.

Joonisel on veel näidatud ühenduskaablite varjestussukad, mis varemkäsitletud põhjusel maandatakse vaid ühest otsast. Varjestussukad ühendatakse vastava lülituse maandusklemmiga *2*.

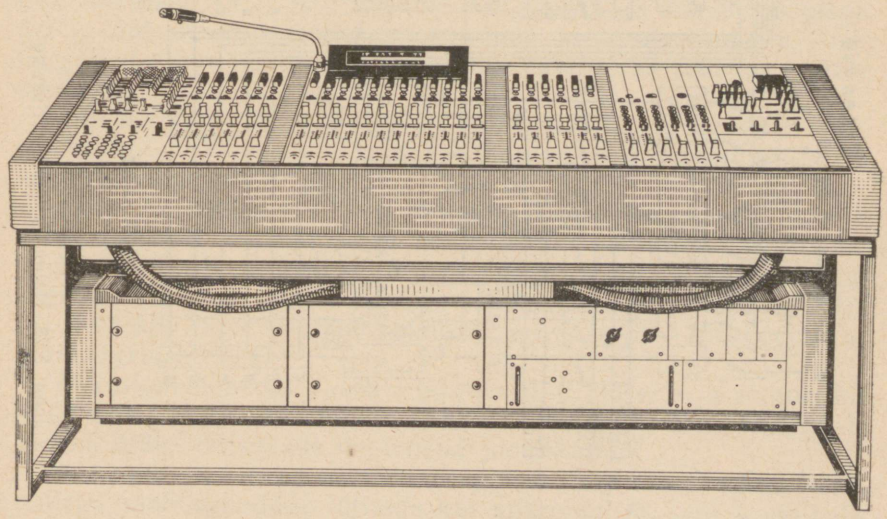
Puldi või statiivi maandusklemmid *3* ühendatakse pinnases paikneva maanduriga *M*. Maanduri maandustakistus kui ka ühendusjuhtmete ristlõiked peavad vastama kehtivatele elektriseadmete ehituse eeskirjadele [1, 14]. Viimastest tuleb kinni pidada ka seadmete tugevvoolu-toitejuhtmete valikul ja montaažil.

Ühenduskaablid ühendatakse seadmetega kas statsionaarselt (s. t. joote- või kruviühendusega seadme klemmliistul) või pistikühendusega. Pistikühendustes kasutatakse nn. isepuhastuvaid kontakte. Kontaktide arv ja paigutus on kindlaks määratud vastavate normidega [91, 47].

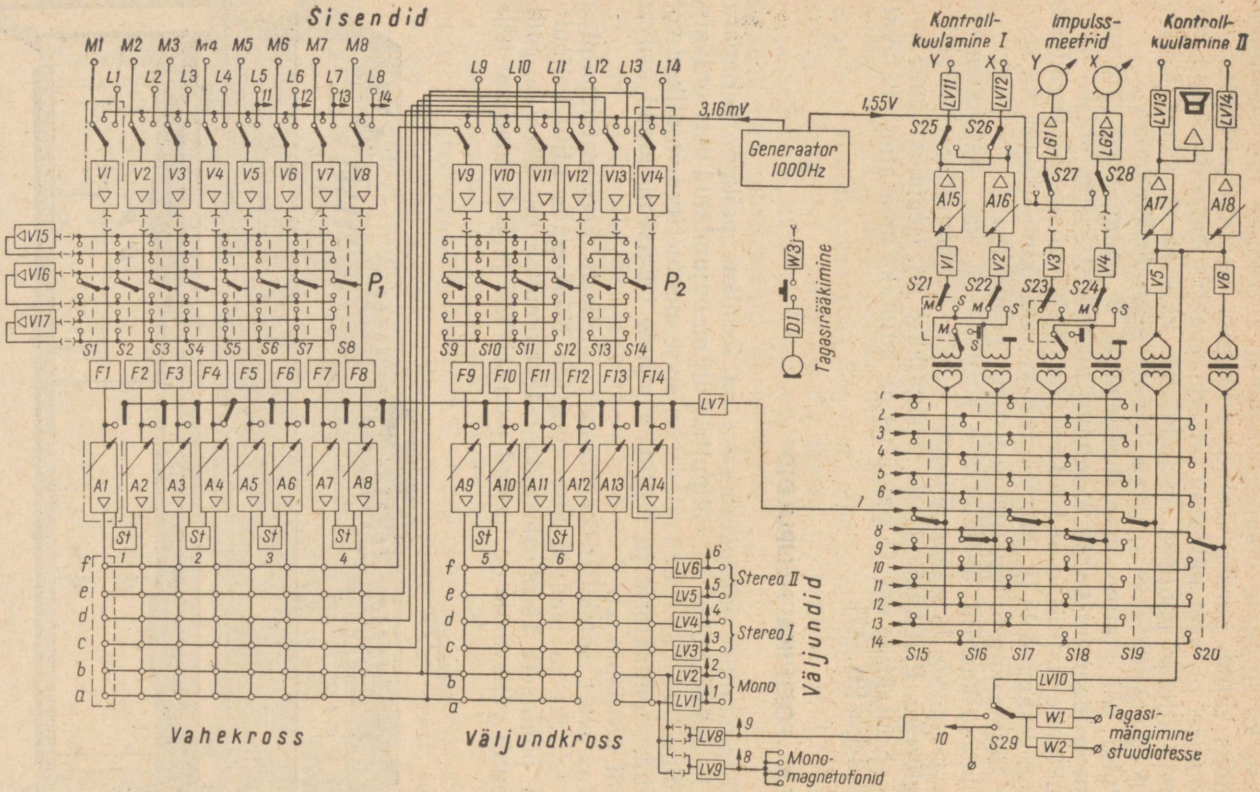
7.9. FOONIKA HELIPULDID

Teenindamise hõlbustamiseks on foonikas paiknev heliaparatuur koondatud ühte nn. helipulti. Pult on kujundatud horisontaalse plaadiga töölauana. Lauaplaati on sisse monteeritud vajalikud võimendid, atenuaatorid ja lülitid. Viimaste käsitsemisnupud asuvad plaadi pealispinnal.

Vastavalt sotsialistlike maade vahelisele kooperatsiooniplaanile tehnika ja teaduse alal varustab Nõukogude Liitu helipultidega põhiliselt Tšehhoslovakkia elektroonikafirma «Tesla», mille helipuldi välisvaade on toodud joonisel 7.27 [17]. Joonisel on näha



Joon. 7.27. Helipuldi välisvaade



Joon. 7.28. Helipuldi struktuuriskeem

puldi horisontaalne plaat sellel asuvate käsitsemisnuppudega, mis on paigutatud loogilises järjekorras vastavalt helikanali lahterskeemile. Plaadil asub veel impulssmeetri skaala ja tagasirääkimise mikrofon. Puldi allosas on toitealaldid, releed ning klemmliistud ühendusliinide ja kaablite külgeühendamiseks.

Helipuldis kasutatakse väikesegabariidilisi lüliteid, atenuaatoreid ja transistorvõimendeid, mis tootmise ja remondi hõlbustamiseks on võimalikult unifitseeritud konstruktsiooniga ning grupeeritud vahetatavatesse moodulitesse e. blokkidesse (kassettidesse).

Puldi struktuuriskeem on joonisel 7.28. Kasutatud on vahevõimendiga süsteemi (vt. § 7.2), kus *V1* ... *V8* on A- ehk mikrofonivõimendid, *V9* ... *V14* on B- ehk vahevõimendid ja *LV1* ... *LV6* on C- ehk liinivõimendid. *A1* ... *A8* on individuaalmikserid ja *A9* ... *A14* üldmikserid. Nende kommuteerimine toimub vastavalt vahe- ja väljundkrossi abil. Kumbki kross on kuue väljundlatiga (*a* ... *f*) ja surunuppkonstruktsiooniga. Seega iga individuaalmikseri väljund on ühendatav kuni kuue vahevõimendi sisendisse ja iga üldmikser kuni kuue liinivõimendiga.

Lülitusvõimalusi ja skeemi paindlikkust suurendavad veel vahekommutaatorid P_1 ja P_2. Esimene neist koosneb kuuepositsioonilistest lülititest *S1* ... *S8* ja võimaldab mistahes mikrofonivõimendiga järjestikku lülitada ühe kolmest lisavõimendist *V15* ... *V17*, et vajaduse korral suurendada mõne mikrofonikanali tundlikkust. Lisavõimendite skeem ja võimendustegur on sama mis mikrofonvõimenditelgi.

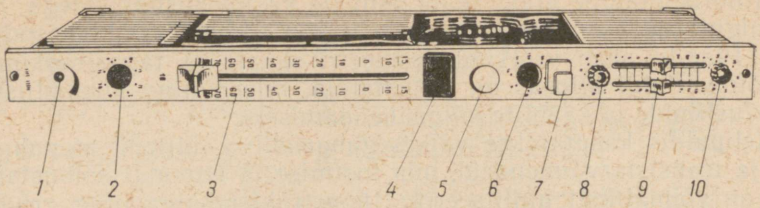
Teise vahekommutaatori P_2 lülitid on grupeeritud kahte sektsiooni (*S9* ... *S12* ja *S13*, *S14*). Sektsioonist *S9* ... *S12* moodustatakse stereoülekande või -salvestuse puhul kaks stereokanalit, milleks mikserid *A9* ... *A12* ühendatakse vastavate stereoblokkidega *St5* ja *St6* stereosignaali formeerimiseks ja reguleerimiseks. Analoogilised stereoblokid *St1* ... *St4* ühendatakse ka individuaalmikseritega.

Üks helipult võib samaaegselt teenindada kahte stuudiot. Sektsiooni *S13*, *S14* kasutatakse siis teise programmi ülekandeks või salvestuseks.

F1 ... *F14* on muudetava sageduskarakteristikuga filtrid. Iga filtri sageduskarakteristik on astmeliselt reguleeritav sagedustel 60 Hz ja 10 kHz kolme dB kaupa piirides —15 ... +15 dB ning sagedusel 0,7; 1; 1,4; 2; 2,8 või 4 kHz kahe dB kaupa piirides 0 ... +8 dB. Filter sisaldab võimendi, mistõttu filtri ülekandetegur läbilaskeribas on 1.

Mikrofonivõimendi *V*, sellel järgnev lüliti, filter *F* ja atenuaator *A* on konstruktiivselt koondatud ühte vahetatavasse moodulisse e. plokki, mille välisvaade on toodud joonisel 7.29.

Iga mikrofonivõimendi sisendis paikneb 8-positsiooniline lüliti, millega saab sisendisse lülitada kas mikrofoni *M*, liini *L* või heligeneraatori. Lüliti ülejäänud viis positsiooni on mikrofonisisendi



Joon. 7.29. Helipuldi universaalne blokk:
1 — mikrofonivõimendi kalibreerimine, *2* — sisendlüliti, *3* — lükandatenuaator, *4* — signaallambid, *5* — kontrollkuulamise lüliti, *6* — vahekommutaator, *7* — ühenduspistik, *8* ja *10* — filtri sageduste 0,7...4 kHz valik ning reguleerimine, *9* — filtri sageduskarakteristiku reguleerimine sagedustel 60 Hz ja 10 kHz

tundlikkuse vähendamiseks 10 dB kaupa. Mikrofonisisendi sisendtakistus on 1 kΩ.

Atenuaator *A* sisaldab võimendi, mille sisendisse on lülitatud grafiitplaat-potentsiomeeter. Viimase liugkontakti nihutamisega on komplekti potentsiomeetervõimendi ülekandetegur muudetav piires +15...0...−80 dB. Võimendi väljundtakistus on ca 10 Ω.

Mikrofonivõimendi võimendustegur reguleeritakse täpsele väärtusele 2500 võimendi ühe transistorastme koormustakistuse muutmisega. Vastava potentsiomeetri võll on toodud universaalse bloki esikaanele. Atenuaatori ja sisendlüliti asendites 0 dB on universaalse bloki nimisisendpinge 0,1 mV, nimiväljundpinge 250 mV (koormusel 1 kΩ), signaali ja müra suhe 47 dB ning mittelineaarmoonutus 0,25%. Maksimaalne väljundpinge on 5 V, mispuhul mittelineaarmoonutus on 0,4%. Mitme individuaalmikseri *A* lülitamisel vahekrossi samale latile on iga mooduli väljund koormatud ülejäänute väljundtakistuste rööplülitusega, mis põhjustab nimiväljundpinge vastava vähenemise. Samu mooduleid kasutatakse ka B-võimenditeks koos vastavate filtrite ja üldmikseritega.

Liinivõimendite *LV* väljundtakistus on 40 Ω, nimiväljundpinge 1,55 ja maksimaalne väljundpinge 3,1 V koormustakistusel 200 Ω.

Kogu puldi mittelineaarmoonutus on kas 0,4% või 0,7% väljundpingel vastavalt 1,55 või 3,1 V; sagedusmoonutused +1,5... ...−2 dB sagedusalas 30 Hz...15 kHz; signaali ja müra suhe 53 dB sisendpingel 0,2 mV.

Liinisisendite *L1*...*L14* nimipinge on 1,55 V, maksimaalne pinge 30 V, sisendtakistus 10 kΩ ja puldi signaali ja müra suhe vähemalt 70 dB.

Pulte toodetakse kuni 25 mikrofonisisendiga, kusjuures vastavalt suurendatakse universaalsete blokkide arvu.

Skeemi (joon. 7.28) parempoolses osas on kujutatud puldi kontrollseadmed, kus seitsmepositsioonilised surunupplülitid *S15*...*S20* moodustavad nn. kontrollkommutaatori. Viimane võimaldab kontrollkuulamise ja impulssmeetrite võimendeid ühendada

helikanali 14 punkti. Lülitid *S21* ... *S24* on kontrollkuulamise ja impulssmeetrite mono-stereo-ümberlülitid.

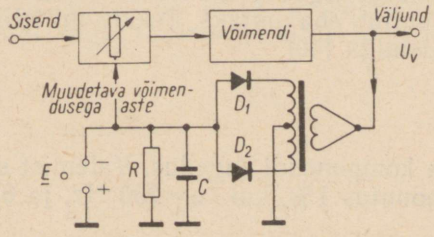
Remondi ja hooldamise hõlbustamiseks on puldi horisontaalne plaat pööratav vertikaalseks. 18 mikrofonisisendiga helipuldi mõõtmed on järgmised: laius 1,84 m, sügavus 0,9 m, kõrgus 0,84 m. Võrgust tarbitav võimsus on 200 VA.

7.10. PIIRAJAD

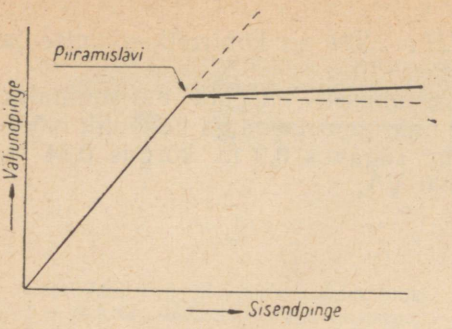
Helikanalis kasutatava piiraja ülesandeks on tõkestada maksimaalselt lubatavast suuremate pingeamplituudide edasipääsu helikanali järgmistesse lülidesse.

Kuigi heliülekandel eelnevate proovide või ka kogemuste põhjal on enam-vähem teada maksimaalne oodatav helitase mingis helilõigus ja vastavalt sellele reguleeritakse mikseri(te) sumbumust, võib siiski ettenägematult esineda eeldatust suuremaid helitugevusi. Viimased põhjustaksid kas saatja ülemoduleerimise või helisalvestusel kajaefekti magnetlindi lubamatult tugeva magnetiseerimise tõttu. Taoliste moonutuste vältimiseks kasutatakse helikanalis piiramisvõimendit. Viimase ülesandeks on etteantud maksimaalselt lubatavast suuremate pingeamplituutide tekkimisel järsult vähendada võimendust ja seega vältida moonutuste tekkimist helikanali järgmistes lülides.

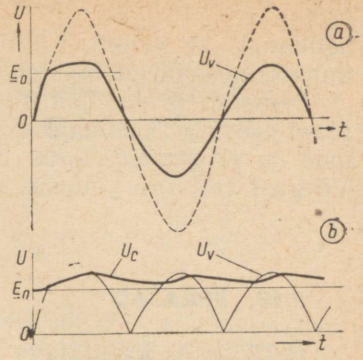
Tavalise piiraja skeem (joon. 7.30) koosneb muudetava võimendusega astmest, millele järgneb harilik lineaarvõimendi. Viimase väljundpinge detekteeritakse täisperioodalaldiga ja saadud alalispinge tüürib muudetava võimendusega astet. Kui alaldi väljundpinge U_v ei ületa dioodidele D_1 ja D_2 antud negatiivset tõkkepinget E_0, on muutuva võimendusega astme võimendus konstantne. Piiramine algab, kui väljundpinge ületab dioodide tõkkepinge. Siis hakkab alaldi tööle, negatiivne pinge selle väljundis suureneb ja vähendab muudetava võimendusega astme võimendust. Kui sisendpinge nivoo langeb normaalsele tasemele, tühjeneb kondensaator C läbi koormustakisti R ajakonstandiga $\tau = CR$ ning piiraja võimendus taastub normaalseks. Et taastumine toimuks küllalt kiiresti, on ajakonstandi optimaalseks väärtuseks leitud $\tau = 0{,}4 \ldots 0{,}8$ s.



Joon. 7.30. Piiraja struktuuriskeem



Joon. 7.31. Piiraja amplituudikarakteristik



Joon. 7.32. Piiraja tööprotsessi ostsillogrammid

Muudetava võimendusega astmes kasutatakse kas väljatransistori [40] või muudetava tõusuga pentoodi [87] ja piiraja arvutatakse vastavalt automaatreguleerimise teooriale [31, 63, 128].

Piiraja amplituudikarakteristik sisendpinge efektiivväärtuse suhteliselt aeglastel muutustel on toodud joonisel 7.31. On näha, et allpool piiramisläve töötab piiraja tavalise võimendina, kuid kui sisendpinge ületab piiramisläve, väheneb piiraja võimendus ning väljundpinge edasine suurenemine on väga väike.

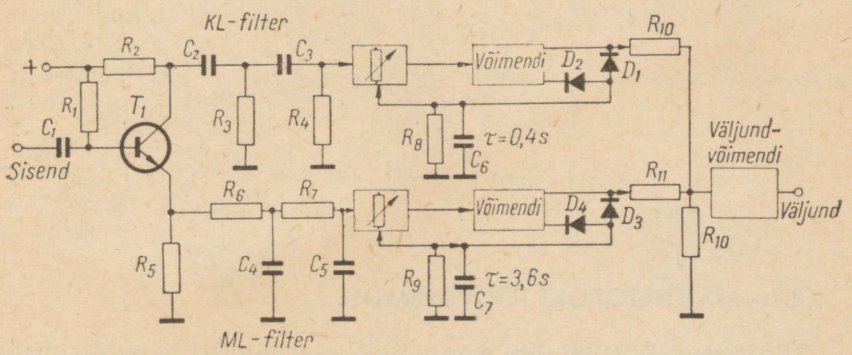
Piiraja tööd selgitab ostsillogramm (joon. 7.32.*a*), kus kriipsjoonega on näidatud väljundpinge ilma piirajata. Kui väljundpinge hetkväärtus ületab tõkkepinge E_0 dioodidel, laadub kondensaator C täiendavalt ning suurenev negatiivne tüürpinge vähendab piiraja võimendust.

Joon. 7,32.*b* on näidatud täisperioodalaldi tööprotsess. On näha, et täisperioodalaldi väljundpinge U_c pulseerib sisendpinge kahekordse sagedusega. Kui väljundpinge U_v hetkväärtus on väiksem kui U_C, toimub kondensaatori C eksponentsiaalne tühjenemine läbi koormustakisti R ajakonstandiga $\tau = RC$. Pulseeriva tüürpinge U_C tõttu pulseerib ka piiraja võimendus, mis põhjustab moonutusi, eriti muusikaülekande puhul. Nimelt domineerivad muusikapalade spektris sageli madalsageduslikud komponendid (vt. § 1.8). Kui nende nivoo ületab maksimaalselt lubatava, algab piiramine ja piiraja võimendus alustab pulseerimist vastava madalsagedusliku komponendi kahekordse sagedusega. Samaaegselt ülekantavate kõrgema sagedusega komponentide tugevus muutub U_C pulseerimise taktis, mistõttu helipilt muutub ebapuhtaks. Tekkiv mittelineaarmoonutus on arvutatav valemiga [40]

$$k_{ml} = \frac{1}{\tau - f_M} \cdot 100\%,$$

kus f_M = piiramist põhjustava komponendi sagedus. Valemist selgub, et kui $\tau = 0{,}45$ s, tekib moonutus 1%, kui $f_M = 250$ Hz, ja 8%, kui $f_M = 32$ Hz.

Taolised moonutused on tavalise piiraja üheks puuduseks; teiseks puuduseks tuleb lugeda nn. sooloinstrumendi efekti. See tekib, kui mõne üksiku muusikariista, näit. trompeti helitugevus ületab piiramisläve. Siis piiraja vähendab kanali võimendust, mistõttu saatvate bassinstrumentide helitugevus nõrgeneb ning helipilt jätab ebaloomulikult kõrge ja kileda mulje. Analoogiliselt võib basstrummide forte põhjustada piiramise, mistõttu lubamatult nõrgeneb kõrgemates registrites mängivate muusikariistade heli.



Joon. 7.33. Kaheribalise piiraja struktuuriskeem

Kirjeldatud puudused on kõrvaldatud nn. kaheribalises piirajas [40], mis sisaldab kaks paralleelselt lülitatud piirajat, üks kõrgete, teine madalate helisageduste jaoks (joon. 7.33). Sisendpinge antakse siin jaotatud koormusega transistorastmele T_1, kus toimub faasi pööramine 180°, et kompenseerida T_1-le järgnevate filtrite faasinihet. Astme kollektoriga on ühendatud RC-kõrgläbivusfilter ja emitteriga RC-madalläbivusfilter. Filtrite lõikesagedus (nivool —6 dB) on 250 Hz ja faasinihe sellel sagedusel vastavalt $\pm 90°$. Piirajad on skeemilt ühesugused, erinedes vaid ajakonstandi τ poolest, mis kõrgete helisageduste piirajal on 0,4 s ja madalate helisageduste piirajal 3,6 s. Piirajate väljundpinged, mis sagedusel 250 Hz on samafaasilised, liidetakse ja võimendatakse ühises väljundvõimendis. Kaheribalises piirajas ei teki ülalnimetatud mittelineaarmoonutust ja on kõrvaldatud ka domineeriva sooloinstrumendi mõju saateinstrumentide helitugevusele.

8.

Magnetiline helisalvestus

8.1. MAGNETOFONI TÖÖPÕHIMÕTE

Tänapäeval kasutatakse magnetilist, mehaanilist ja optilist helisalvestust.

Magnetilisel helisalvestusel salvestatakse informatsioon magnetlindile, mis liigub ühtlase kiirusega v läbi salvestuspea pilu eest (joon. 8.1). Seejuures lindi magnetkiht magneetub pikisihis (joon. 8.2).

Taasestamiseks keritakse lint tagasi ja lastakse sama kiirusega v läbi taasestuspea pilu eest, kusjuures lindi magnetvoog läbib taasestuspea ja indutseerib selle mähises elektromotoorjõu e (joon. 8.3), mis antakse taasestusvõimendi sisendisse.

Taasestamine ei põhjusta muutusi lindi magneedituses, mistõttu on põhimõtteliselt korratav meelevaldne arv kordi ilma helikvaliteedi vähimagi halvenemiseta.

Uue informatsiooni salvestamiseks lint eelnevalt demagneeditakse, s. t. vana salvestus kustutatakse. Selleks lastakse lint läbi kustutuspea pilu eest (joon. 8.1). Pea mähist toidetakse kõrgsagedusgeneraatorist ja pilu ees tekkiv tugev vahelduv magnetväli demagneedib lindi.

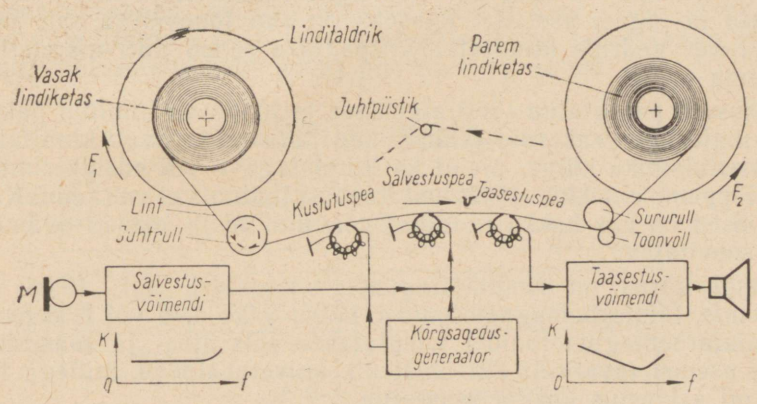
Lindi kasutusiga piirab plastikaadist aluskihi rabedaks muutumine aastate jooksul ja mehaaniline deformeerumine taasestamisel halvasti reguleeritud lindiveomehhanismiga magnetofonil.

Magnetilise helisalvestuse suur loomutruudus on tingitud kõrgsagedusliku eelmagneetimise kasutamisest salvestusel. Nimelt antakse salvestuspea mähisesse peale helisagedusliku vahelduvvoolu salvestusvõimendist veel kõrgsageduslik vool kõrgsagedusgeneraatorist (joon. 8.1). Viimase tugevus peab 5...6 korda üle-

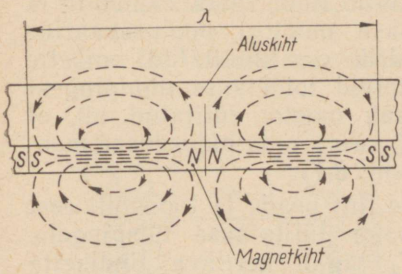
tama maksimaalse helisagedusvoolu. Laiatarbemagnetofonidel reguleeritakse kõrgsageduslik vool välja tehases ettenähtud linditüübile, professionaalsetel magnetofonidel aga enne helisalvestust vastavalt kasutatavale lindile. Kõrgsageduslik eelmagneetimine vähendab tunduvalt mittelineaarmoonutust ja müranivood. Selle nähtuse avastasid juhuslikult 1940. a. Braunmühl ja Weber.

Helisalvestuseks kasutatava magnetofonilindi laius on 6,25 mm. Ringhäälingu stuudiomagnetofonides kasutatav lint on keritud põskedeta metallsüdamikule vabalt kandva kettana, mis kinnitatakse magnetofoni linditaldrikule (joon. 8.1.). Lint on keritud südamikule, töökiht väljapoole. Kasutatakse ka põskedega metallpoole, läbimõõduga 200 ... 270 mm, mis mahutavad 340 ... 750 m linti paksusega 55 μm.

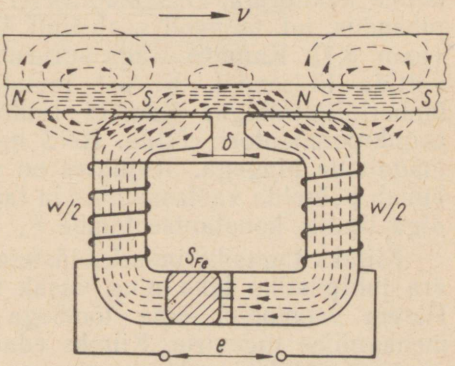
Laiatarbe- ja reporterimagnetofonides kasutatakse põskedega plastmasspoole või erilisi lindikassette [47a].



Joon. 8.1. Magnetofoni lahterskeem



Joon. 8.2. Magneetunud magnetlint



Joon. 8.3. Magnetvoo kulg läbi taasestuspea

Plastmasspoolide läbimõõt on 75...180 mm ja mahutavus 50...350 m linti paksusega 55 μm. Lint keritakse poolile töökihiga sissepoole.

Magnetofoni laadimise ja lintide säilitamise hõlbustamiseks on välja töötatud kassettmagnetofonid, kus lint koos peale- ja mahakeriva südamikuga on paigutatud väikesesse plastmassist lamedasse karbikesesse ehk kassetti [47a]. Kasseti mõõtmed (100×65×8,5 mm) on rahvusvaheliselt standardiseeritud. Kassett mahutab 90 m linti paksusega 18 μm ja laiusega 3,81 mm ning lindikiirusel 4,76 cm/s on kaherajalise salvestuse puhul mängukestuseks 2×30 minutit. Lint on paigutatud kassetti töökihiga väljapoole ja lindikulu hindamiseks on kasseti põses vaateava.

Kassett kaitseb linti tolmumise ja vigastuste eest ning on ühe käeliigutusega asetatav magnetofonile või sealt ära võetav. Teise raja taasestamiseks tuleb kassett magnetofonist välja võtta, ümber pöörata ja tagasi asetada. Kassetis on ava toonvõllile, mis jääb lindi taha. Vedrule kinnitatud viltpadjake surub linti magnetpea tööpinna vastu.

Kassetti paigutatud lindi algusesse ja lõppu on liimitud paksemast materjalist rakordid (stardiribad), mis on tugevalt kinnitatud kerimissüdamike külge, nii et ka kiirel tagasi- või edasikerimisel lindi lõppemisel tekkivast järsust tõmbest lindi ots ei vallandu. Kasseti põsed on kas kokku needitud või liimitud ja kasseti avamine pole soovitatav.

Lindi kiirus on ringhäälingumagnetofonidel 38,1; 19,05 või 9,55 cm/s, laiatarbemagnetofonidel 19,05; 9,53; 4,76 või 2,38 cm/s. Laiatarbemagnetofonidel kasutatakse salvestus- ja taasestuspeade asemel tavaliselt üht ühist nn. universaalpead, millega toimub nii salvestus kui ka taasestus.

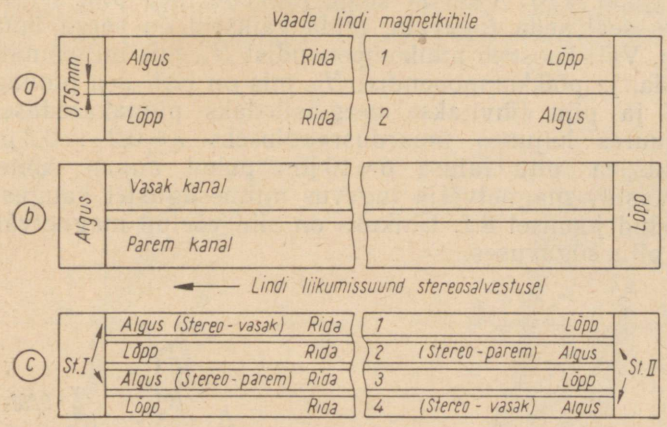
Ringhäälingu stuudiomagnetofonide lindiveomehhanism on kolme mootoriga. Üks mootoreist on sünkroonmootor, mille võlli pikendus, nn. toonvõll veab linti ühtlase kiirusega peade eest läbi (joon. 8.1). Kummikettaga sururull surub lindi vastu toonvõlli, et vältida libisemist. Kiirust muudetakse mootori poolusepaaride ümberlülitamisega. Kumbki linditaldrik on kinnitatud omaette asünkroonmootori võllile. Neid mootoreid toidetakse nimipingest madalama pingega. Seejuures on vasak mootor lülitatud nii, et püüab pöörelda vastassuunas ja tagab seega oma pidurdusmomendiga lindile konstantse tõmbe F_1 (joon. 8.1).

Kiireks tagasikerimiseks tõstetakse lint peade ja toonvõlli eest ära juhtpüstiku taha ning vasak mootor lülitatakse täispingele. Parem veomootor oma tõmbega F_2 tagab keritava lindiketta mehaanilise tugevuse. Kiireks edasikerimiseks lülitatakse parem veomootor täispingele, vasak aga madalamale pingele. Magnetofoni seiskamisel pidurdatakse mootorid elektromagnetitega käitatavate lint- või ketaspiduritega. Töökindluse suurendamiseks kasutatakse lüliteiks hermetiseeritud kontaktidega nn. keelreleesid [127]

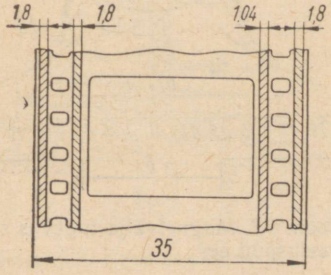
ning kontaktivabu transistor-lülitusskeeme. Helikvaliteedi parendamiseks on praegusaegsetel magnetofonidel automaatsed lindi pinguse ja toonmootori kiiruse regulaatorid [68, 76].

Laiatarbe- ja reporterimagnetofonid [85] on enamasti ühe mootoriga, mis käitab kas otseselt või vaherataste kaudu toonvõlli ning läbi friktsioon- e. hõõrdeajamite vasakut ja paremat lindipooli. Lindi kiiruse muutmiseks on toonvõllil äravõetav pealmik või mootori võllil astmikseib. Pidurite käitamine ja hõõrdajamite ümberlülitamine toimub mehaaniliselt, kang- või tross-süsteemiga, mis on sidestatud lindiveomehhanismi juhtnuppudega.

Kui ringhäälingumagnetofonides on monofooniline salvestus üherajaline, siis laiatarbemagnetofonides kasutatakse kahe- ja neljarajalist salvestust. Kaherajalise salvestuse heliteede paigutust lindil näitab joonis 8.4.*a*. Pärast esimese ülemise raja taasestust siin linti tagasi ei kerita, vaid parem lindiketas tõstetakse ümber vasakuks, millega alumine rida *2* keeratakse üles peade ette ning järgneb teise raja taasestus. Tänu sellele saab samale lindile salvestada kaks korda pikema programmi.



Joon. 8.4. Heliteede paigutus lindil



Joon. 8.5. Magnetribade paigutus laiekraanfilmil

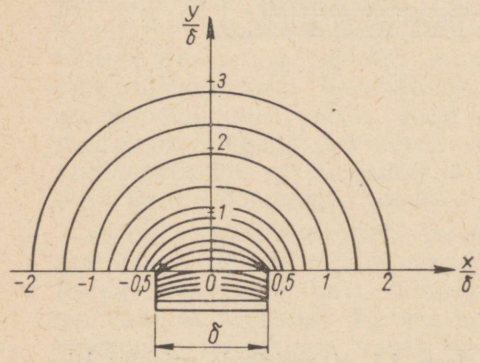
Stereolindil (joon. 9.4.*b*) on vasak kanal salvestatud ülemisele, parem kanal alumisele rajale. Tavaline magnetofon taasestab stereolindilt mõlema kanali summa, s. t. monofoonse signaali.

Neljarajalisel salvestusel (joon. 8.4.*c*) on lindi näidatud asendis taasestatav kas 1. või 3. rida, mis valitakse vastava ümberlüliti abil. Pärast vasaku ja parema pooli ümbervahetamist on taasestatav kas 2. või 4. rida. Stereokanalite paiknemine neljarajalisel salvestusel on näidatud samal joonisel.

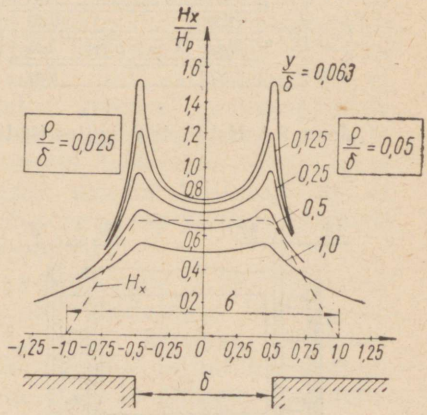
Stereoheliga laiekraanfilmi (35 mm) magnetribade paigutus ja laius on näidatud joonisel 8.5. Kui laiekraanfilmil on neli magnetilist helirada, siis laifilmil (70 mm) on neid kuus, igaühe laius 1,8 mm [122].

8.2. KUSTUTUS- JA SALVESTUSPROTSESS [115, 131]

Magnetväli pea pilu ees [123]. Nii kustutus- kui ka salvestuspea mähist läbib vahelduvvool, millest tekib pea pilu ees vahelduv magnetväli (joon. 8.6). Väli on kõige tugevam pea pilu servade lähedal, olles seal seda tugevam, mida väiksem on serva ümardusraadius ϱ. Väli koosneb pikikomponendist H_x, mis on suunatud piki pea pinda, ja põikkomponendist H_y, mis on risti pea pinnaga. Pea esipind ja pilu lihvitakse peegelsiledaks pinnakaredusega 0,1 μm. Seejuures kujuneb ümardusraadiuseks $\varrho = 0{,}2 \ldots 0{,}3$ μm, mis salvestuspea pilu laiuse $\delta \approx 10$ μm puhul annab suhteks $\varrho/\delta \approx 0{,}025$. Vastav magnetvälja tugevus mitmesugustel kaugustel peast on toodud joonisel 8.7. Ühikuks on siin võetud magnetvälja tugevus H_p pilu sügavuses.



Joon. 8.6. Magnetvälja salvestuspea pilu ees

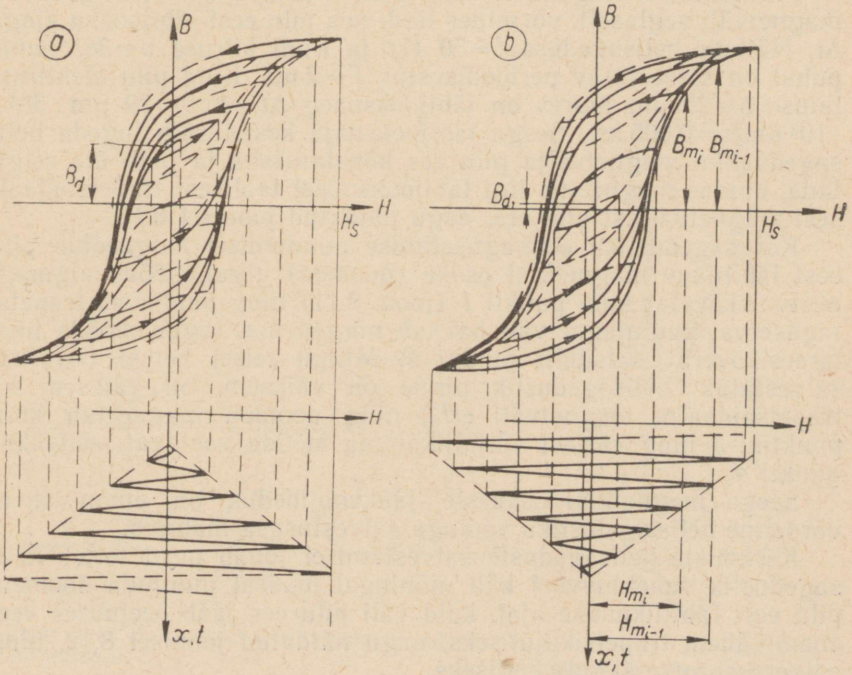


Joon. 8.7. Magnetvälja tugevus salvestuspilu ees

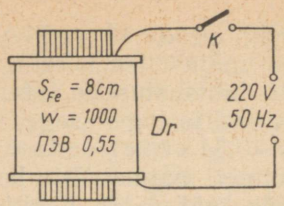
Et magnetkihi paksus magnetofonilindil on $a = 10 \ldots 25$ μm, järeldub joonisest, et lindi magnetkihile mõjub tema erinevas sügavuses erineva tugevusega magnetväli. Lihtsustuseks arvestatakse magnetkihile mõjuva keskmise magnetvälja tugevusega, mis vastab umbes kihi keskel (kui $a \approx \delta$, siis $y = 0{,}5a = 0{,}5\delta$) valitsevale väljale. Joonisel 8.7 on näidatud kriipsjoonega magnetvälja keskmine pikikomponent H_x. Nagu hiljem selgub, määrab H_x põhiliselt lindi magneetumise salvestusprotsessis. Pikikomponendi ulatust nimetatakse pea pilu efektiivseks laiuseks σ. Tavaliselt $\sigma = 2\delta$, s. t. efektiivne pilu laius on tegeliku laiuse kahekordne.

Kustutusprotsess. Salvestuse kustutamiseks lint demagneeditakse vahelduva magnetvälja poolt kustutuspea pilu ees. Lindi läbijooksmisel pea pilu eest satub lint algul tsooni, kus vahelduva magnetvälja tugevus kasvab. Seejuures lint vahelduvalt magneeditakse ümber järjest tugevneva välja poolt kuni küllastuseni (joon. 8.8.*a*). Pilu eest väljumisel hakkab vahelduva magnetvälja tugevus vähenema, lint magneeditakse ümber, kuid järjest nõrgeneva välja poolt. Seejuures lint täielikult demagneetub (joon. 8.8.*b*).

Eelmise salvestuse kustutamiseks võib kasutada ka nn. kustutusdrosselit. Viimane kujutab endast raudsüdamikuga pooli (joon. 8.9), mida toidetakse vahelduvvooluvõrgust 220 V, 50 Hz.



Joon. 8.8. Kustutusprotsess



Joon. 8.9. Kustutusdrosseli skeem

Drossel *Dr* koos lülitusnupuga *K* on monteeritud käeshoitavasse puitümbrisesse. Kustutamine toimub järgmiselt. Viies drosseli küllalt kaugele teises käes hoitavast lindikettast, lülitatakse nupuga *K* vool sisse, drossel tuuakse lindi juurde ja liigutatakse südamiku otsa ringikujuliselt ketta külgpinna lähedal umbes 30 s jooksul. Seejärel viiakse drossel vähemalt 1 m kaugusele ja lülitatakse välja. Nii on välditud sise- ja väljalülitamisimpulsside võimalik magneetiv mõju lindile. Kustutusdrosseliga demagneeditakse ka lindi montaažkäärid, kui need juhuslikult magneetuvad, ning magnetofoni linditee pärast remonti (või stuudiomagnetofonidel enne vastutusrikast võtet).

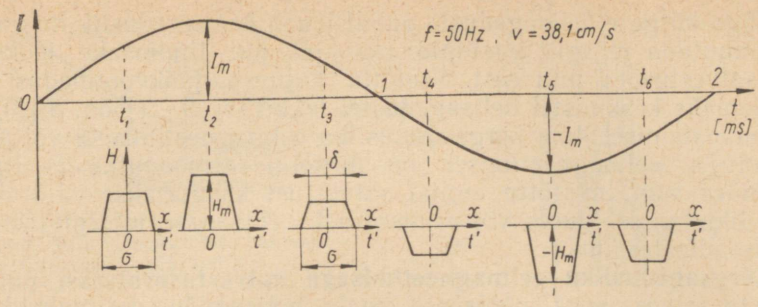
Salvestusprotsess eelmagneetimise puudumisel. Vaatleme lähemalt salvestusprotsessi madalate, keskmiste ja kõrgete helisageduste salvestamisel juhul, kui ei kasutata kõrgsageduslikku eelmagneetimist.

Madalate helisageduste salvestamisel muutub helisageduslik magnetväli aeglaselt, võrreldes lindi pea pilu eest läbijooksu ajaga Δt. Näiteks helisageduse $f = 50$ Hz ja lindi kiiruse $v = 38{,}1$ cm/s puhul on salvestatav perioodikestus $T = 2$ ms. Kuid pilu efektiivse laiuse $\delta = 20$ μm juures on läbijooksuaeg $\Delta t = \delta : v = 20$ μm : $381 \cdot 10^3$ μm/s = 0,005 ms. Seega läbijooksuaja kestel võib lugeda helisagedusliku magnetvälja pilu ees konstantseks ja jääb üle selgitada, kuidas magneetub lint läbijooksmisel taolisest trapetsoidaalsest magnetväljast pilu ees, nagu näidatud joonisel 8.10.

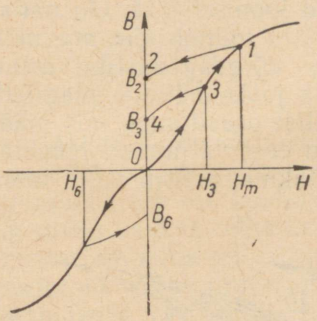
Kõrgsagedusliku eelmagneetimise puudumisel magneetub pilu eest läbiliikuv magnetkihi osake (doomen) algul mööda algmagneetimiskõverat kuni punkti *1* (joon. 8.11) ning jõudmisel trapetsi tagaserva, kus magnetväli hakkab nõrgenema, liigub mööda hüstereesikõvera osatsüklit punkti *2*. Mingil teisel hetkel (t_3), kui salvestatav helisageduslik pinge on väiksem, on väiksem ka trapetsoidaalne magnetväli (H_3) ning doomen magneetub kuni punktini *3* ning väljast väljaliikununa mööda vastavat osatsüklit punkti *4*.

Seega magnetkihi osakeste jääkvootihedus on enam-vähem võrdeline helisagedusliku vooluga salvestuspea mähises.

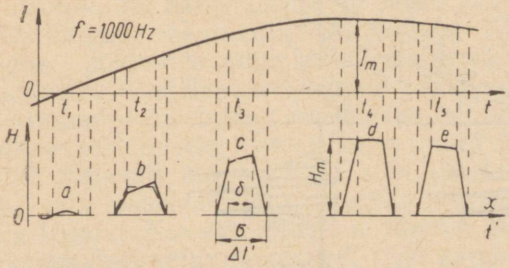
Keskmiste helisageduste salvestamisel jõuab pead toitev helisageduslik vahelduvvool küll mõningal määral muutuda doomeni pilu eest läbiliikumise ajal, kuid väli pilu ees jääb seejuures veel enam-vähem trapetsikujuliseks, nagu näidatud joonisel 8.12, ning salvestusprotsessi kulg endiseks.



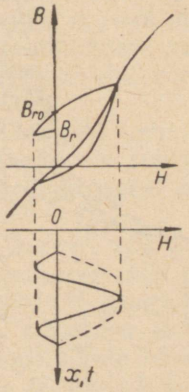
Joon. 8.10. Madalate helisageduste salvestusprotsess



Joon. 8.11. Domeni magneetimise kulg



Joon. 8.12. Kõrgemate helisageduste salvestusprotsess



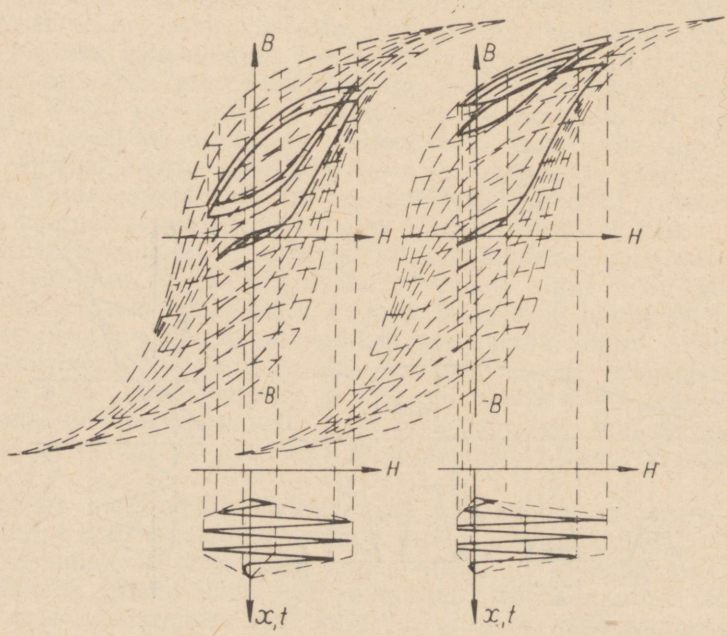
Joon. 8.13. Kõrgete helisageduste salvestusprotsess

Väga kõrgete helisageduste puhul jõuab helisageduslik magnetväli muutuda märgilt vastupidiseks ajal, mil lindiosake jookseb läbi salvestuspea pilu eest. Seetõttu kujuneb jääkvootihedus B_r väiksemaks keskmistel helisagedustel tekkivast B_{r0} (joon. 8.13).

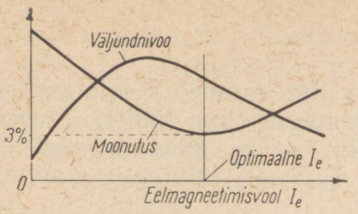
Salvestamisel ilma kõrgsagedusliku eelmagneetimiseta või alalisvooluga eelmagneetimisel on mittelineaarmoonutus ja lindi omamüra suur, mistõttu taolist salvestust kasutatakse vaid lihtsate diktofonide juures või eriotstarbeks (binaarse informatsiooni mäluseadmetes jms.).

Kõrgsagedusliku eelmagneetimisega salvestusprotsessi puhul antakse salvestuspea mähisesse peale helisagedusliku vahelduvvoolu veel kõrgsageduslik eelmagneetimisvool, mis on mitu korda tugevam helisageduslikust voolust, kuid ei põhjusta veel magnetkihi küllastumist.

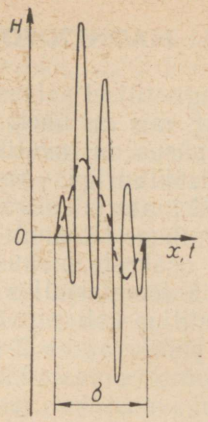
Salvestusprotsessi kulg on näidatud joonisel 8.14. On näha, et trapetsoidaalse helisagedusliku välja tõttu toimub siin magnetkihi ebasümmeetriline ümbermagneetimine kõrgsagedusliku eelmagneetimise poolt. Trapetsi horisontaalosa jooksul liigub magnetkihi osakese tööpunkt mööda ebasümmeetrilist osasilmust, mis määrab ka osakese jääkmagnetismi pärast pilu eest väljumist. Nimetatud osasilmuse tõttu on magnetosakese jääkmagnetism siin märksa



Joon. 8.14. Salvestusprotsess kõrgsagedusliku eelmagneetimise rakendamisel



Joon. 8.15. Optimaalse eelmagneetimisvoolu määramine



Joon. 8.16. Kõrgete helisageduste salvestus kõrgsagedusliku eelmagneetimise puhul

suurem ja mittelineaarmoonutus väiksem kui salvestusel ilma kõrgsagedusliku eelmagneetimiseta. Liiga suure eelmagneetimisvoolu puhul tekib nn. kustutusefekt ja lindile salvestatud helisageduslik nivoo hakkab vähenema. Salvestatud nivoo ja mittelineaarmoonutuse sõltuvus eelmagneetimisvoolust on toodud joonisel 8.15. Magnetofoni väljareguleerimisel seadistatakse eelmagneetimisvool maksimaalsele väljundnivoole vastavast veidi suuremaks. Seejuures tekib küll salvestusnivoo väike langus, kuid mittelineaarmoonutus on minimaalne.

Kõrgete helisageduste salvestamisel jõuab helisageduslik magnetväli pilu ees teatavasti oma märki muuta. Nüüd on helisageduslikule väljale liitunud kõrgsageduslik eelmagneetiv väli (joon. 8.16). Helisagedusliku välja vastassuunaline impulss nihutab magnetkihi osakese tööpunkti negatiivsemate jääkvootiheduste väärtuste poole, mistõttu kujunev jääkmagnetism on väiksem, võrreldes keskmistel helisagedustel tekkivaga.

Taoline nn. salvestuspea piluefekt põhjustab kõrgete helisageduste languse magnetilisel salvestusel. Kuid sellest veel suurema languse põhjustab lindi demagneetumine ja taasestuspea piluefekt, mida vaadeldakse lähemalt tagapool.

Siinjuures tuleb veel tähelepanu juhtida nn. *kopeer-* ehk *kajanähtuse* tekkimisele. Nimelt salvestatud lindi kerimisel rulli põhjustab tugevalt magneeditud koht ka naaberkeerdude magneetumise, mis taasestamisel on kuulda mitmekordse, ennetuva ja hiline va kajana. Kui salvestusel ei ületata antud linditüübile lubatud maksimaalset salvestusnivood, jääb kajanivoo ca 55 dB võrra viimasest nõrgemaks ega mõju häirivalt. Kopeernähe on nõrgem paksema aluskihiga ja suurema koertsitiivjõuga lintidel.

8.3. MAGNETOFONILINT

Magnetilisel salvestusel kasutatav lint koosneb plastmasskilest alusest, mis on ühelt küljelt kaetud magneetuva kihiga. Magnetkihi paksus on tavaliselt 10 ... 18 μm ja see koosneb nõel- või kuupstruktuuriga γ-raud(III)oksiidi (γ-Fe_2O_3) pulbri ja plastmassist sidematerjali segust.

Vaatleme lähemalt lindi valmistamise tehnoloogiat [67]. γ-Fe_2O_3 pulbri osakeste pikkus on 0,2 ... 0,8 μm ja läbimõõt $^1/_2$ ... $^1/_6$ sellest. Lähtematerjaliks on õlivärvi valmistamiseks kasutatav mittemagnetiline kollane või punane värvimuld α-Fe_2O_3, mis taandatakse pöörlevas ca 2 m pikkuses ja 1 m läbimõõduga reaktoris juurdeantava vesiniku abil 300 ... 400 °C juures umbes 1 tunni jooksul mustaks raud(II, III)oksiidiks Fe_3O_4. Nüüd lastakse reaktoril jahtuda ca 100 °C-ni, misjärel juhitakse reaktorisse hapnikku ja veidi kuumutatakse, kuni algab oksüdeerimisprotsess. Seejuures piiratakse juurdeantava hapniku hulka nii, et protsess toimuks küllalt aeglaselt ja võimalikult madalal temperatuuril. Vaid siis toimub Fe_3O_4 hapendumine magnetiliseks γ-Fe_2O_3-ks. Kiirel ja kõrge temperatuuri juures hapendumisel tekiks tagasi lähtematerjal — α-Fe_2O_3.

Saadud γ-Fe_2O_3 pulbrile lisatakse atsetooni, toluooli, butüülalkoholi ja aglomeerumist takistavat märgujat. Pärast 10 ... 36-tunnist aeglast segamist jahvatatakse massi kuulveskis 17 ... 36 tunni jooksul. Spetsiaalsete kiirekäiguliste kuulveskite kasutamisel [67] piisab 1-tunnisest segamisest ja 10-tunnisest jahvatamisest.

Jahvatamise lõpul võetakse emulsioonist proov, millest valmistatakse lühike kontroll-lint. Kui selle omadused vastavad normidele, on emulsioon kõlblik valamiseks lindi aluskihile.

Piiratud määral kasutatakse lindi magnetkihiks ka Fe-Co-ferriidi puru ning katsetamisel on kroomdioksiidist töökihiga lindid.

Aluskiht peab olema mehaaniliselt tugev, niiskuskindel ja tuleohutu.

Levinuim aluskihi materjal on praegu polüvinüülkloriidkile paksusega 33 ... 41 μm. Kilekanga laius on umbes 1 m ja pikkus 1000 ... 2000 m rullis. Lindi kvaliteedi tõstmiseks on materjali mõlemas suunas korra mehaaniliselt pingutatud — venitatud. Suurema tõmbetugevusega on polüetüleen-tereftalaat (ka lavsaan ehk terüleen), mistõttu selle kile võib olla 25 μm paks ning spetsiaalsete lintide puhul kõigest 12,5 μm. Terüleen aga venib tunduvalt enne katkemist, mistõttu katkenud kohas ja selle kaugemas ümbruses muutub salvestus kõlbmatuks. Erimenetlusega on võimalik orienteerida terüleeni molekule kile valmistamise ajal, mistõttu materjali tõmbetugevus suureneb ja venivus väheneb ning saadakse nn. ülipikaealised lindid.

Varemkasutatud atsetaattselluloos on polüvinüülkloriidist rabedam, eriti pärast mõneaastast seismist. Ka on sellest raskem valmistada küllalt pikki ja laiu defektideta kangaid.

Enne aluskihile valamist lisatakse kuulveskist tulnud emulsioonile veel sidematerjali, plastifikaatorit, vaiku, määrdeainet ja tolmukõrvaldajat.

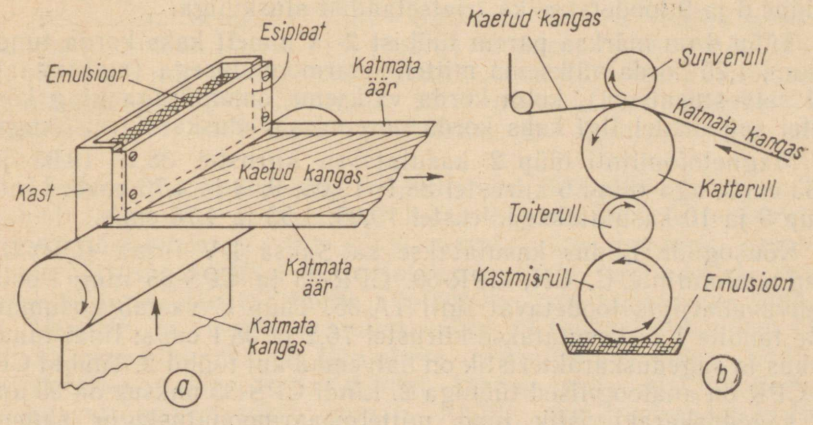
Sidematerjali ülesandeks on koos magnetpulbriga moodustada alusmaterjalil vastupidav töökiht pärast lahustite aurustumist. Käesoleval ajal on kasutatavam sidematerjal üks bakeliitlakkidest, nn. vinüliit. Varem kasutatud nitrotselluloos andis küll peegelsileda pinna, kuid oli kleepuv. Sidematerjali maht on umbes $^1/_2$ magnetpulbri omast.

Plastifikaator annab sidematerjalile painduvuse, vaik sitkuse. Määrdeaineks lisatakse 1,25 ... 2,5 mahuprotsenti mõnda silikoonõli, see väldib töökihi kleepumise, eriti troopikatingimustes.

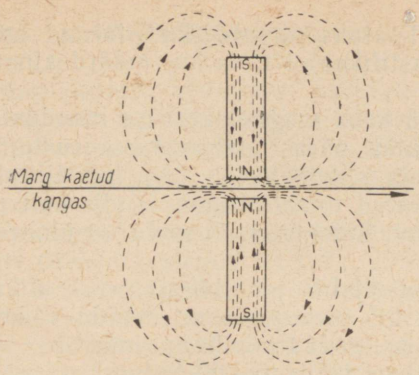
Lindi läbijooksmisel peade eest tekib töökihi kulumise tagajärjel tolm. Et see ei kataks õhukese kihina peade esipinda ega seega halvendaks kõrgete helisageduste salvestust ja taasestust, lisatakse emulsioonile tolmu kõrvaldavat ainet. Valmis emulsiooni hoitakse spetsiaalsetes segistusanumates pidevas liikumises, kus ta säilib valamiskõlblikuna mitu päeva.

Plastmasskangas kaetakse ühtlase emulsioonikihiga kas piludosaatoriga või värvirullmenetlusel (joon. 8.17), misjärel kangas jookseb kiirusega 10 ... 70 meetrit minutis läbi kuivatusahju, kus temperatuur on 40 ... 65 °C ja toimub vedeldaja aurustamine ning kangale jääb 10 ... 18 µm paksune magnetkiht.

Ahju algusosas jookseb kangas samanimeliste magnetpooluste pilu vahelt läbi, mistõttu toimub magnetpulbri osakeste orienteerimine piki kanga liikumissuunda (joon. 8.18). Tänu sellele suureneb lindi tundlikkus ca 4 dB võrra ja müranivoo väheneb 1 ... 3 dB võrra. Ahjust väljuv kangas jookseb veel üle kuuma (t=95 °C) rulli, misjärel keritakse rulli või läheb otsekohe lõikamisele.



Joon. 8.17. Aluskile katmine emulsioonikihiga piludosaatori abil (*a*) ja värvirullmenetlusel (*b*)



Joon. 8.18. Magnetosakeste orienteerimine märjal kangal

Kangas lõigatakse pöörlevate ketasnugadega standardse laiusega (enamasti 6,25 mm) lintideks, mis keritakse lindisüdamikele või -ketastele. Lindi tagaküljele võidakse trükkida perioodiliselt korduvana lindi valmistamisaasta ja seerianumber. Toodetud linti kontrollitakse tehases nn. etalonpeadega varustatud magnetofoni abil [90]. Magnetofonilinte hoitakse pappkarpides. Karpe lindiga tuleb hoida kõrval päikesekiirte eest ja vähemalt 1 m kaugusel küttekehadest (keskkütteradiaator, ahi jms.). Sobivaim hoidmistemperatuur on 16 ... 18 °C suhtelise niiskuse 55 ... 65% juures.

Kasutatavaim magnetofonilint on 6,25 mm lai ja perforeerimata. Toodetavate tüüpide põhiandmed on tabelis 8.1 [90].

Laiatarbemagnetofonidele toodetakse linte tüüp 2, 6 ja 9 (atsetaattselluloosist aluskihiga)ja tüüpi 10 (lavsaanist aluskihiga). Tüüpide 2 ja 6 paksus on 50 ... 55 μm, sellest magnetkihti 15 μm, tüüpide 9 ja 10 paksus on 34 ... 37 μm (magnetkiht 10 ... 12 μm). Tüüpe 6 ja 9 toodetakse ka triatsetaadist aluskihiga.

Tüüp 6 on märksa parem tüübist 2 ja nimelt kaks korda tundlikum, 1,25 korda väiksema mittelineaarmoonutusega (maksimaalsel salvestusnivool), kolm korda väiksema omamüraga ning kõrgetel sagedustel ligi kaks korda parema sageduskarakteristikuga.

Magnetofonilinti tüüp 2 kasutatakse kiirustel 38,1; 19,05 ja 9,53 cm/s, aga tüüpi 6 kiirustel 38,1; 19,05; 9,53 ja 4,76 cm/s. Linte tüüp 9 ja 10 kasutatakse kiirustel 19,05; 1,53 ja 4,76 cm/s.

Nõukogude Liidus kasutatakse ka Saksa DV firma «ORVO» magnetofonilinte C, CH, CPR-50, CPR-35 ja CPS-35 ning Poola Rahvavabariigis toodetavat linti TA-35. Tüüp C vastab kodumaisele tüübile 1 ja kasutatakse kiirustel 76,2 ja 38,1 cm/s; lindi tundlikkus ja sageduskarakteristik on halvemad kui tüübil 2. Tüübid CH ja CPR on analoogilised tüübiga 2. Lindi CPS-35 paksus on 35 μm ja sageduskarakteristik ning mittelineaarmoonutustegur samad mis tüübil 6.

Tabel 8.1

Magnetofonilintide tüübid

Tüüp	Lindi paksus µm	Mitte-lineaar-moonutus %	Müranivoo dB		Kaja-nivoo dB	Kasutusala
			pausi ajal	magneeditud lindil		
ЛМЗ-6-55 ЛМЗ-6-55П	55	1,8	—60	—40	—58	Stuudiomagnetofonid
ЛМЗ-6У-55 ЛМЗ-6У-55П		0,5	—57	—42	—56	
ЛМЗ-6-37 ЛМЗ-6-37П	37	1,5	—50	—36	—53	Stuudio-, reporteri- ja laiatarbemagnetofonid
ЛМЗ-6-27П	27	2,5	—50	—37	—53	Reporteri- ja laiatarbemagnetofonid ning diktofonid
ЛМЗ-6-18П	18	5,0	—50	—40	—55	

Märkus. Täht П tähistab suurendatud tõmbetugevust, täht У — suuremat lubatavat salvestusnivood ja täht К — väiksemat kajaefekti.

Vastavalt standardile ГОСТ 8303—62 toodetakse perforeerimata magnetofonilinti veel laiusega 12,70; 19,05; 25,40; 35,00; 50,80 ja 70,00 mm ning perforeeritud linti laiusega 16; 17,5; 32,35 ja 70 mm.

Normaalpaksusega (55 µm) 6,25 mm laiusele lindile lubatav tõmme magnetofonil on 1 N (102 g) ja õhematel 0,6 N (61,2 g).

Maksimaalne lubatav salvestusnivoo on 6,25 mm laiusel normaalpaksusega (55 µm) lindil 2000 pWb ja õhematel lintidel 1600 pWb [90, 114]. Seda nimetatakse ka normaal- ehk täisnivooks.

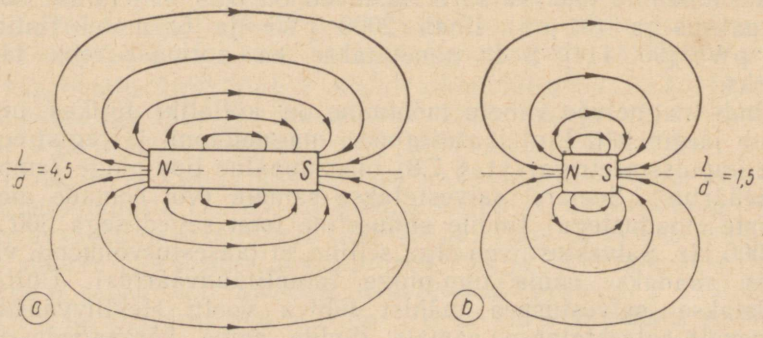
Lindi magnetvoo vahetu mõõtmine on küllaltki tülikas ning toimub järgmiselt. Lint taasestatakse magnetofonil ja registreeritakse impulssmeetriga (vt. § 7.8) maksimaalne tipp-pinge (amplituudiväärtus). Seejärel salvestatakse samale (või samade magnetiliste omadustega) lindile siinuseline toon sagedusega 300 ... ... 1000 Hz. Salvestusnivoo olgu seliine, et taasestusvõimendi väljundis saadakse sama tipp-pinge (amplituudväärtus). Ühtlasi mõõdetakse salvestuspea mähist läbiva voolu efektiivväärtus. Järgnevalt salvestatakse samale lindile sama kõrgsagedusliku eelmagneetimisega signaal alalisvooluga, mille tugevus võrdub eelmise, siinuselise signaali efektiivväärtusega ja mõõdetakse

lindi jääkmagnetvoog ballistilise galvanomeetriga. Selleks lõigatakse lindist ca 10 juppi, mis paigutatakse galvanomeetri mõõtepooli. Et pool haaraks lindilõikude kogu magnetvoo, peavad lindilõigud olema vähemalt 5 korda mõõtepoolist pikemad. Lindipaki väljatõmbamisel mõõtepoolist läbib galvanomeetrit laeng, mis on võrdeline lindilõikude magnetvooga. Olgu valguskiire hälve α mm ja galvanomeetri konstant k_G pWb/mm; siis 10 jupi puhul on lindi salvestusnivoo $\Phi = 0{,}1\alpha k_G$ pWb.

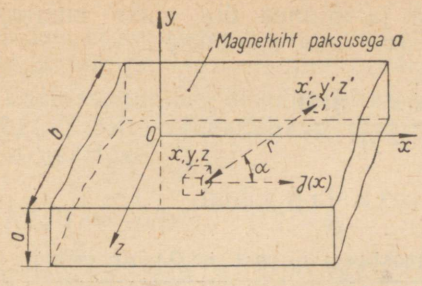
Täisnivoo antakse mõnikord magnetvoona 1 m laiuse lindi (salvestusjälje) kohta ja on siis vastavalt kas 320 nWb/m või 256 nWb/m.

8.4. MAGNETOFONILINDI DEMAGNEETUMINE

Teatavasti on lühem vardakujuline püsimagnet nõrgem — selle magnetvoog väiksem — kui sama ristlõikega ja samast materjalist pikem magnet, sest lühemat magnetit ümbritseva õhuruumi magnetiline takistus on suhteliselt suurem kui pikemal magnetil. Piltlikult on see näha joonisel 8.19, kus on kujutatud kahe varrasmagneti magnetvälja jõujoonte kulg. Kuigi üks magnet on teisest 3 korda lühem, pole selle jõujooned kolm korda lühemad, vaid keskmiselt $\sqrt{3}$ korda lühemad. Et 3 korda lühema magneti magnetomotoorjõud Θ on samuti 3 korda väiksem, kuid ümbritseva ruumi magnetiline takistus R_M pole vähenenud kolm korda, vaid kõigest $\sqrt{3}$ korda, siis valemi $\Phi = \Theta / R_M$ põhjal ongi lühema magneti, magnetvoog Φ väiksem kui pikemal magnetil. Seda nähtust nimetatakse *demagneetumiseks* ja iseloomustatakse demagneetumisteguriga N. Jagatis $N/4\pi$ võrdub magnetvoo suhtelise vähenemisega, võrreldes samast materjalist ja sama ristlõikega lõpmatult pika magnetiga. Kui näiteks magnetil, mille pikkuse l ja läbimõõdu d suhe $l/d = 10$, on magnetvoog kõigest 1,7% väiksem



Joon. 8.19. Erineva pikkusega magnetite jõujoonte kulg



Joon. 8.20. Magnetilise potentsiaali arvutamise juurde

kui samast materjalist ja sama läbimõõduga lõpmatult pikal magnetil ($N/4\pi=0{,}017$), siis magnetil, mille pikkus võrdub läbimõõduga ($l/d=1$) on demagneetumistegur $N/4\pi=0{,}27$ ning magnetvoog vaid 73% lõpmatult pika magneti voost.

Kõrgetel helisagedustel on lindile salvestatud magnetid lühikesed ja nende demagneetumise tõttu tekib sageduskarakteristikul lisalangus kõrgetel sagedustel. Lindi demagneetumus arvutatakse magnetilise potentsiaali abil järgmiselt [11].

Eeldatakse, et lint on magneeditud siinuseliselt intensiivsusega $J(x)=J_m \sin(2\pi x/\lambda)$ ja vaadeldakse lindi magnetkihi elementi ruumalaga $dV=dx\,dy\,dz$ kohas x, y, z (joon. 8.20). Selle elemendi magnetmoment $M=J(x)\cdot dx\,dy\,dz$ põhjustab töökihi mõnes teises punktis x', y', z' kaugusel r magnetilise potentsiaali

$$dU_M = \frac{M}{r^2}\cos\alpha = \frac{M}{r^2}\frac{x'-x}{r} =$$

$$= \frac{J(x)\,dx\,dy\,dz(x'-x)}{[(x'-x)^2+(y'-y)^2+(z'-z)^2]^{3/2}}.$$

Punkti x', y', z' kogu magnetiline potentsiaal, põhjustatud lindi kõikidest elementaarruumaladest (teljed x ja z on paigutatud magnetkihi välisele pinnale, kus $y=0$):

$$U_M = \int_{-b/2}^{b/2}\int_{-a}^{0}\int_{-\infty}^{0} dU_M = \int_{-b/2}^{b/2}\int_{-a}^{0}\frac{(x'-x)J(x)\,dx\,dy\,dz}{[(x'-x)^2+(y'-y)^2+(z'-z)^2]^{3/2}}.$$

Arvestades seost $\int (A+B^2)^{-3/2}\,dB = B/(A\cdot\sqrt{A+B^2})$ [82] ja asjaolu, et magnetkihi laius b on palju suurem selle paksusest a ning salvestatud lainepikkusest λ, saadakse pärast teisendusi

$$U_M = 2\int_{-a}^{0}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{(x'-x)J(x)\,dx\,dy}{(x'-x)^2+(y'-y)^2}.$$

Asendades $J(x)=J_m \sin(2\pi x/\lambda)$ ja minnes üle uuele muutujale $x'-x=s$, mispuhul $x=x-s$ ja $dx=-ds$, saadakse:

$$U_M = 2\int_{-a}^{0} dy \int_{-\infty}^{\infty} \frac{-sJ_M \sin[2\pi(x'-s)/\lambda]}{s^2+(y'-y)^2}\, ds. \tag{8.1}$$

Seose $\sin(\alpha-\beta)=\sin\alpha\cos\beta-\cos\alpha\sin\beta$ põhjal

$$U_M = -2\int_{-a}^{0} dy \int_{-\infty}^{\infty} \frac{sJ_m[\sin(2\pi x'/\lambda)\cos(2\pi s/\lambda)-\cos(2\pi x'/\lambda)\sin(2\pi s/\lambda)]}{s^2+(y'-y)^2}\, ds.$$

Kontuurintegraalse teisenduse põhjal

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{s\sin ks}{s^2+p^2}\, ds = \pi e^{-kp}$$

ja

$$U_m = 2\pi J_m\left(e^{-\frac{2\pi y'}{\lambda}}\int_{-a}^{y'} e^{\frac{2\pi y}{\lambda}}\, dy + e^{\frac{2\pi y'}{\lambda}}\int_{y'}^{0} e^{-\frac{2\pi y}{\lambda}}\, dy\right)\cos\frac{2\pi x'}{\lambda} =$$

$$= \lambda J_m\left\{2-\left[e^{-\frac{2\pi}{\lambda}(y'+a)}+e^{\frac{2\pi y'}{\lambda}}\right]\right\}\cos\frac{2\pi x'}{\lambda}. \tag{8.2}$$

Demagneetumist põhjustavad vastassuunalise magnetvälja piki linti suunatud komponent (magnetkihi sügavuses y')

$$H_N(x') = -\frac{\partial U_M}{\partial x'} = -2J_m\left\{2-\left[e^{-\frac{2\pi}{\lambda}(y'+a)}+\right.\right.$$

$$\left.\left.+e^{\frac{2\pi y'}{\lambda}}\right]\right\}\sin\frac{2\pi x'}{\lambda}. \tag{8.3}$$

Selle keskväärtus magnetkihi ristlõikes (kohas x)

$$\bar{H}_N(x') = \frac{1}{a}\int_{-a}^{0} H_N(x)\, dy' =$$

$$= -4\pi J_m\left[1-\frac{\lambda}{2\pi a}\left(1-e^{-\frac{2\pi a}{\lambda}}\right)\right]\sin\frac{2\pi x'}{\lambda} \tag{8.4}$$

ja demagneetumistegur (keskmine, ristlõike kohta)

$$\mathbf{N} = -\frac{\bar{H}_N(x')}{J(x')} = 4\pi\left[1-\frac{\lambda}{2\pi a}\left(1-e^{-2\pi a/\lambda}\right)\right]. \tag{8.5}$$

On näha, et kui lainepikkus λ on suur, võrreldes magnetkihi paksusega a, siis demagneetumine on tühine.

Vastassuunalise, demagneetiva magnetvälja tugevuse $\bar{H}_N(x') = \mathbf{N} J(x')$ tõttu väheneb magnetvälja tugevus magnetkihis ja saab nüüd väärtuse

$$N(x') = H_0(x') - \bar{H}_N(x'),$$

kus $H_0(x')$ on magnetvälja tugevus demagneetumiseta (kui $\lambda \gg a$). Suhe

$$\frac{H(x')}{H_0(x')} = \frac{H(x')}{H(x') + \bar{H}_x(x')} = \frac{1}{1 + \dfrac{\mathbf{N}}{H(x')} J(x')} = \frac{1}{1 + \dfrac{B_r}{H_c} \dfrac{\mathbf{N}}{4\pi}}, \tag{8.6}$$

kus B_r ja H_c on magnetkihi maksimaalne jääkvootihedus ja koertsitiivjõud; seejuures on arvestatud, et $4\pi J(x') = B(x')$ ja $B(x')/H(x') \approx B_r/H_c = \mu$ — magnetkihi magnetiline läbitavus.

Lainepikkuse lühenedes demagneetumistegur läheneb oma piirväärtusele $\mathbf{N}_{max} = 4\pi$. Seejuures väljatugevuste suhte piirväärtus

$$\lim_{\mathbf{N} \to 4\pi} \frac{H(x')}{H_0(x')} = \frac{1}{1 + B_r/H_c}. \tag{8.7}$$

Et magnetofonilintidel suhe $B_r/H_c = 2 \ldots 4$, siis demagneetumiskaod ei ületa 10 ... 15 dB.

Lainepikkustel, kus $\lambda \geqslant a$, võib suuruse $\exp(-2\pi a/\lambda)$ asendada oma reaksarenduse kolme esimese liikmega:

$$e^{-2\pi a/\lambda} \approx 1 - \frac{2\pi a}{\lambda} + \frac{1}{2}\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2.$$

Nüüd väljatugevuste suhe

$$\frac{H(x')}{H_0(x')} = \frac{1}{1 + \dfrac{B_r}{H_c} \dfrac{\pi a}{\lambda}} = \frac{1}{1 + \dfrac{B_r}{H_c} \dfrac{\pi a f}{v}}. \tag{8.8}$$

8.5. TAASESTUSPROTSESS

Taasestusel läbib lindi magnetvoog taasestuspea ja indutseerib selle mähises elektromotoorjõu e (joon. 8.3). Elektrotehnikast [45, 37] on teada, et kui mähist keerdude arvuga w läbib siinuseliselt muutuv magnetvoog $\Phi = \mathrm{I}_m \sin \omega t$, siis mähises indutseeritakse emj.

$$e = -w \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -w\Phi_m\omega \cos \omega t, \tag{8.9}$$

mille amplituudväärtus $e_m = w\Phi_m\omega$ on võrdeline sagedusega. Seega madalatel ja keskmistel sagedustel, kus lindi demagneetumist veel ei esine, muutub taasestuspea emj. võrdeliselt sagedusega. See on nn. *f*-tüüpi sagedusmoonutus. Kõrgetel sagedustel esineb peale lindi demagneetumise veel nn. *piluefekt*, mis põhjustab indutseeritava emj. lisavähenemise. Vaatleme seda lähemalt.

Olgu lint magneeditud siinuseliselt, nii et magnetkihi osakeste jääkmagneetumus $J(x) = J_m \sin (2\pi x/\lambda)$ (joon. 8.21). Vastav magnetomotoorjõud magnetkihi pikkuse $\mathrm{d}x$ kohta $\Theta(x)\,\mathrm{d}x = 4\pi J(x)\,\mathrm{d}x/\mu$. Taasestuspea pilu laiuse δ puhul on pilu ees paikneva lindiosa magnetomotoorjõud

$$\Theta = \int_{x_1}^{x_1+\delta} \Theta(x)\,\mathrm{d}x = \frac{4\pi}{\mu} \int_{x_1}^{x_1+\delta} J_m \sin \frac{2\pi x}{\lambda}\,\mathrm{d}x =$$

$$= \frac{4}{\mu} J_m\lambda \sin \frac{\pi\delta}{\lambda} \sin \frac{2\pi}{\lambda}\left(x_1 + \frac{\delta}{2}\right),$$

millest tekib läbi taasestuspea ja selle pilu ees paikneva lindiosa magnetvoog $\Phi = \Theta/(R_{Mp} + R_{Me})$, kus R_{Mp} ja R_{Me} on vastavalt taasestuspea ja selle ees paikneva lindiosa magnetiline takistus. Lindi liikudes kiirusega v tuleb asendada: $x_1 = vt_1$; Siis taasestuspea mähises indutseeritud emj.

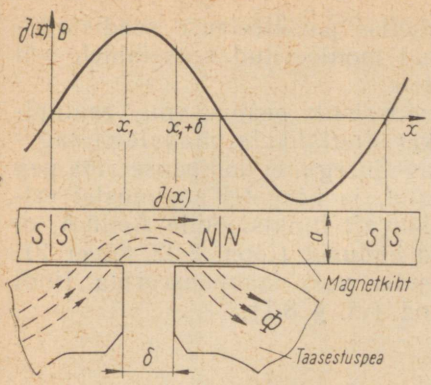
$$e = -w \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} =$$

$$= -\frac{4wv}{\mu(R_{Mp} + R_{Me})} J_m 2\pi \sin \frac{\pi\delta}{\lambda} \cos \frac{2\pi}{\lambda}\left(vt_1 + \frac{\delta}{2}\right).$$

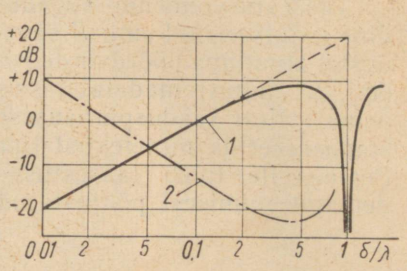
Emj. amplituudväärtus, arvestades, et $v = \lambda f$,

$$E = \frac{8\pi w\lambda f}{\mu(R_{Mp} + R_{Me})} J_m \sin \frac{\pi\delta}{\lambda} = \frac{8\pi^2 wf\delta}{\mu(R_{Mp} + R_{Me})} J_m \frac{\sin \mathrm{A}}{\mathrm{A}}, \tag{8.10}$$

kus $\mathrm{A} = \pi\delta/\lambda = \pi\delta f/\lambda$. Tuleb märkida, et permalloi suure läbitavuse tõttu ($\mu_p \approx 10\,000$) on taasestuspea magnetiline takistus R_{Mp} väik-



Joon. 8.21. Taasestuspead läbiva magnetvoo tekkimine



Joon. 8.22. Taasestuspeas indutseeruv emj. (*1*) ja taasestusvõimendi sageduskarakteristik (*2*)

sem pilu ees oleva magnetkihi magnetilisest takistusest $R_{Me} = \delta/(\mu S_e)$. Seetõttu võib arvestada vaid ainult viimasega ja valem 8.10 saab kuju

$$E = 8\pi^2 w f S_e J_m \frac{\sin \mathbf{A}}{\mathbf{A}}, \qquad (8.11)$$

kus S_e on magnetkihi ristlõikepind. Pead läbiva magnetvoo täpseks arvutamiseks tuleks kasutada magnetilise potentsiaali mõistet (vt. § 8.4).

Emj. sõltuvus suhtest δ/λ on toodud joonisel 8.22. Madalatel sagedustel, kus pilu laius $\delta \ll \lambda$, suureneb emj. võrdeliselt sagedusega. Kui pilu laius võrdub lainepikkusega, siis $(\sin \mathbf{A})/\mathbf{A} = 0$ ja ka $E = 0$. Lindi kiirusel $v = 19{,}1$ cm/s ja $\delta = 12$ μm puhul vastab see sagedusele 16 kHz. Sageduskarakteristiku langust kõrgetel sagedustel, tingitud taasestuspea pilu lõplikust laiusest, nimetataksegi piluefektiks.

Magnetofoni tööpiirkond ulatub vaid sagedusteni, kus $\delta/\lambda \approx 0{,}8$ ja piluefektist tingitud kaod $y = (\sin 0{,}8\pi)/0{,}8\pi = 0{,}235$, s. o. -13 dB.

Kaod kõrgetel helisagedustel võivad tekkida veel siis, kui taasestus- ja salvestuspea pilud pole täpselt paralleelsed. Tekkivad sagedusmoonutused arvutatakse valemiga

$$y_p = (\sin \mathbf{B})/\mathbf{B}, \text{ kus } \mathbf{B} = (2\pi f b \operatorname{tg}\alpha)/v = (2\pi b \operatorname{tg}\alpha)/\lambda$$

(b — lindi laius, α — piludevaheline nurk). Näiteks tavalise laiusega lindi puhul ($b = 6{,}25$ mm) ja kiiruse $v = 19{,}1$ cm/s juures piisab taasestuspea kaldest 6,6 kaareminutit, et põhjustada sagedusel $f = 8$ kHz sageduskarakteristiku langus nullini. Taasestuspea pilu reguleeritakse täpselt risti lindi liikumissuunaga nn. testlindi abil, millele on etalonmagnetofoniga salvestatud kõrge helisage-

dus (§ 8.7). Ristasendi ja omavahelise paralleelsuse seadistamiseks on taasestus- ja salvestuspead monteeritud kiilseibidele või seadekruviga kallutatavatele alustele.

Taasestusvõimendi sageduskarakteristik peab olema vastupidine indutseeritud emj. *E* sageduskarakteristikule: madalatel sagedustel muutuma pöördvõrdeliselt sagedusega, et kompenseerida pea emj. *E* langust madalatel sagedustel, ja kõrgetel sagedustel erinema sellest seaduspärasusest vastavalt funktsioonile $A/\sin A$, et kompenseerida piluefektist tingitud kadusid (joon. 8.22, kõver 2). Peale selle tuleb taasestusvõimendis veel kompenseerida lindi demagneetumisest põhjustatud kaod (vt. § 8.7).

8.6. MAGNETOFONIPEAD

Kui stuudiomagnetofonidel on reeglina kolm pead: kustutus-, salvestus- ja taasestuspea, siis laiatarbemagnetofonidel on kaks pead: kustutus- ja universaalpea. Viimast kasutatakse nii salvestuseks kui ka taasestuseks.

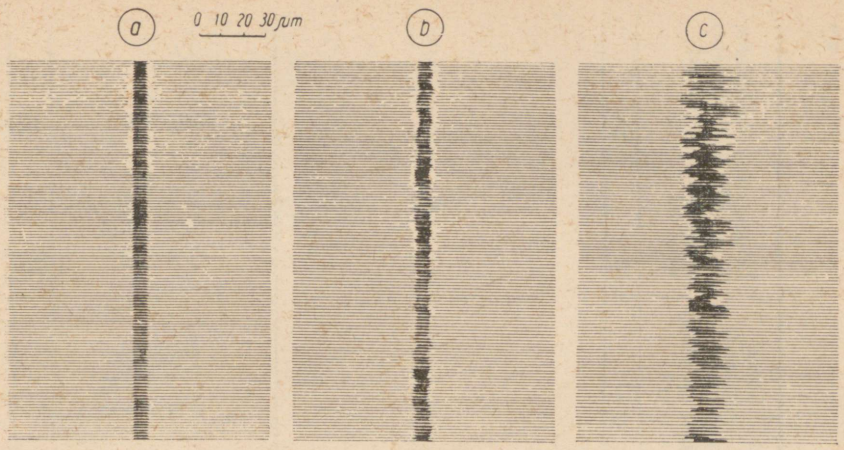
Taasestus- ja universaalpeade südamikud valmistatakse permalloist 79HMÜ või 80HXC, kustutus- ja salvestuspeade südamikud sulamist 50HXC, mille küllastusvootihedus ja eritakistus on suuremad. Südamik koosneb väljastantsitud plekkidest, mis on kokku liimitud bakeliitliimiga БФ-4 või epoksüvaiguga ЭД-6. Kasutatakse ka ferriidist valatud südamikke. Oma suure kulumiskindluse tõttu on ferriit osutunud sobivaks materjaliks eriti videomagnetofoni peadele [86, 131].

Südamikul asuv mähis koosneb tavaliselt kahest järjestikku lülitatud osast, mis on paigutatud sümmeetriliselt. See on eriti vajalik taasestuspea juures, et vähendada mähises indutseeritavaid häirepingeid. Lindiveomootoritest ja pidurite elektromagnetitest põhjustatud häirete vähendamiseks ümbritsetakse taasestuspea veel mitmekordse permalloivarjega (vt. § 7.9).

Taasestuspea pilu peab olema ühtlase laiusega, mida kontrollitakse mikroskoobi МИМ-6 all 300 . . . 600-kordse suurendusega. Joonisel 8.23 on toodud mikrofotod heast, rahuldavast ja kõlbmatust taasestuspilust. On näha, et kvaliteetse pilu servad on sirgjoonelised, südamiku plekid ja liimikiht nende vahel selgelt eristatavad (joon. 8.23.*a*). Rahuldaval pilul lubatakse üksikuid defekte ja kriimustusi poleeritud esipinnal (joon. 8.23.*b*). Kõlbmatul peal on pilu ebaühtlase laiusega, rikutud servadega ja osaliselt lühistatud (joon. 8.23.*c*).

Peade tootmisel pilu ja esipind lihvitakse spetsiaalsetel lihvpinkidel, misjärel südamiku pooled paigutatakse neid koos hoidvasse armatuuri.

Kuna salvestusprotsess toimub pilu tagumise servaga (vt. § 8.2), võiks salvestuspea pilu esiservale lubada mõnevõrra suu-



Joon. 8.23. Hea (*a*), rahuldava (*b*) ja kõlbmatu (*c*) taasestuspea pilu (tugevasti suurendatuna)

remat defektsust. Seeriatootmises töödeldakse mõlemad servad siiski sama kvaliteediga.

Pilu vahele pannakse vastava paksusega vilguleht või berülliumpronksist БрБ2 fooliumiriba. Salvestuspeal on tavaliselt veel tagumine pilu laiusega 60 ... 400 µm, et lineariseerida pea magneetimiskarakteristikut ning vähendada mittelineaarmoonutust salvestusel. Kustutuspea pilu on võrdlemisi lai (150 ... 200 µm) ja selle kvaliteedile ei esitata kuigivõrd rangeid nõudmisi.

Joonisel 8.24 on toodud mitmesuguste magnetofonipeade välisvaated ja joonisel 8.25 nende südamike plekkide kuju ja mõõtmed.

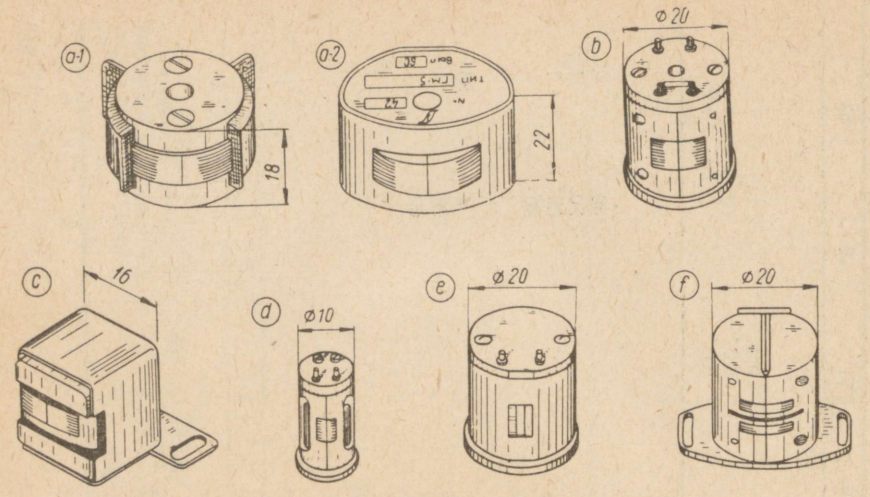
Kõige suuremate mõõtmetega südamik on nn. klassikalisel toroidpeal (joon. 8.25.*a*), mis on kasutusel alates 1935. a. Pea plekid on siin kinnitatud kas alumiiniumseibide vahele (joon. 8.24.*a-1*) või paiknevad epoksüvaiku täisvalatud bakeliitkestas (joon. 8.24.*a-2*). Alates 1960. a. joodetakse südamiku pooled täiendavalt kokku tinapliijoodisega, mis vähendab pilu deformeerumist temperatuuri mõjul.

Et vähendada pöörisvoolu- ja hüstereesikadusid, on kasutusele võetud uue konstruktsiooniga pead, mille südamik on märksa väiksema ruumalaga ning koostatud 0,1 mm paksustest plekkidest (joon. 8.24.*b*, joon. 8.25.*b*). Siin on valgevasest ЛС-59-1 kestal spetsiaalsed uurded südamiku jaoks ning pilu suhtes risti asuvad tõmbepoldid. See ei lase südamikul deformeeruda ja lubab valmistada päid pilu laiusega alates 3 µm. Samalaadse konstruktsiooniga on ka stereopea (joon. 8.24.*f*), kus pilude nihe ei või olla suurem kui 2 µm ning nende omavaheline kalle ületada 3 nurgaminutit. See

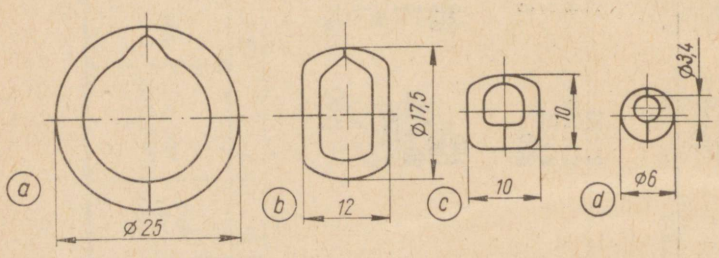
Magnetofonipeade andmeid

Tähis	Südamik		Esipilu		Tagapilu µm	Keerdude arv	*L* mH	*R* Ω	Väljundpinge (400 Hz; 1,6 nWb) mV	Salvestusvool (400 Hz; 1,6 nWb) mA	Eelmagneetimis- või kustutusvool mA	Paralleelne kaotakistus *f*=80 kHz kΩ
	Tüüp	Kõrgus mm	Laius µm	Sügavus mm								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Taasestuspead												
B-02	Toroid	5,8	20	0,6		2×1500	2750	600	3,0			
B-03	„	5,4	10	0,6		2×260	73	8,5	0,63			
МЭЗ-48	Uut tüüpi	5,8	6	0,25		2×245	60	33	0,6			
МЭЗ-59	„	5,8	6	0,3		2×250	67	10	0,6			
ГМ-27	Stereo	2,2	5	0,5		2×400	77	63	0,2			
ГМ-12	Väikese-gabariidiline	5,5	8	1,0		2000	2100	550	2,0			
МГ8В	„	5,5	10	1,0		2000	2000	500	2,0			
МЭЗ-50	Miniatuurne	5,8	10	0,8		2×240	73	73	0,6			
Salvestuspead												
З-02	Toroid-	6,6	10	0,6	400	2×150	8	3		4	12	7
МЭЗ-47	Uut tüüpi	6,3	10	0,4	130	2×350	50	50		2	2	40
МЭЗ-63	„	6,3	10	0,4	130	2×100	4,5	2,5		3	7	4,5
М-26	Stereo	2,4	5	0,5	130	2×170	7,7	14		4	10	6
МГ-8П	Väikese-gabariidiline	6,0	10	1,0	100	600	130	40		0,15	0,35	
ГМ-13	„	6,0	8	0,6	100	190	6,5	5		2	10	4
МЭЗ-52	Miniatuurne	6,3	6	0,8	60	2×240	40	75		2,4	4	40

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Universaalpead												
Dnepr-5	Toroid	6,6	12	6,0		2×1500	1000	130		0,2	1,0	
Dnepr-14A		2,4	5			2×1300	500	700		0,07	0,33	
Daina		2,4	3,3			2×1200				0,07	0,33	
Kustutuspead												
C-02	Toroid	7	200	0,8		2×75	2	2			140	2
C-04	„	7	150	0,8		2×150	8	4			50	4,2
МЭЗ-49	Uut tüüpi	7	150	0,6		2×75	2	11			30	3
МГ-8С	Väikese-gabariidi-line	6,5	150	1,0		300	5	9			80	
МЭЗ-67	Ferriit	7	2×60	0,6		150	4,5	12			4	30
Dnepr-14A		2,4	100			100	0,5	1			120	
Дайна		2,4	180			20+130 +150	5				60	



Joon. 8.24. Magnetofonipead: *a-1*, *a-2* — toroidpea, *b* — uut tüüpi pea, *c* — väikesekaliibriline pea, *d* — miniatuurne pea, *e* — ferriitpea; *f* — stereopea



Joon. 8.25. Magnetofonipeade südamike plekid:
a — toroidpeal, *b* — uut tüüpi peal, *c* — väikesekaliibrilisel peal, *d* — miniatuursel peal

on vajalik selleks, et stereolint oleks kvaliteetselt taasestatav erinevatel stereomagnetofonidel kui ka tavalistel magnetofonidel (viimasel juhul muidugi monofoonilisena). Joonisel 8.24.*f* on näha ka peadevaheline ekraan. Tänu sellele kui ka korpuse erilisele konstruktsioonile on peadevaheline ülekostvus küllalt väike (−33 dB sagedusel 1000 Hz).

Veel väiksema ruumalaga on nn. väikesegabariidilise pea südamik, mille pleki mõõtmed on toodud joon. 8.25.*c*. Südamik koos armatuuriga paikneb permalloikestas (joon. 8.24.*c*). Pead on kasutusel reporterimagnetofonis МЭ3-60 ja kantavas magnetofonis МЭ3-29А. Viimases leiab kasutamist veel kahepiluline ferriitsüdamikuga kustutuspea (joon. 8.24.*e*).

Kõige väiksema ruumalaga on nn. miniatuurse pea südamik (joon. 8.25.*d*). Kest on siin uuretega südamiku jaoks ja kahe tõmbepoldiga (joon. 8.24.*d*). Väikese ruumala ja tugeva konstruktsiooni tõttu on pea eriti häire- ja põrutuskindel ning kasutusel reverberaatoris МЭЗ-45А.

Toodetud päid kontrollitakse tehases peade taasestus- või salvestusomaduste võrdlemise teel nn. etalonpeade suhtes [102].

Kasutatavamate magnetofonipeade andmed on tabelis 8.2., kusjuures stereopeade andmed on ühe kanali kohta. Toodetavate laiatarbemagnetofonide peade andmeid on ka kirjanduses [112].

8.7. MAGNETOFONI VÕIMENDITE SAGEDUSKARAKTERISTIKU KORRIGEERIMINE JA REGULEERIMINE

Taasestusprotsessi lähemal analüüsil (§ 8.5) selgus, et madalatel ja keskmistel helisagedustel muutub taasestuspea emj. võrdeliselt sagedusega $e_m = 2\pi w \Phi_m f$. Seepärast peaks magnetofoni taasestusvõimendi sageduskarakteristik ideaalsel juhul muutuma pöördvõrdeliselt sagedusega: $K_1 = A_1/f$, kus $A_1 = \text{const}$. Kuid taasestusvõimendis tuleb korrigeerida veel lindi demagneetumisest ja piluefektist tingitud kaod.

Vaatleme eelkõige demagneetumiskadude korrigeerimist. Siin vajalik parandustegur M_1 on valemi 8.8 pöördväärtus:

$$M_1 = \frac{H_0(x')}{H(x')} = 1 + \frac{B_r}{H_c} \cdot \frac{\pi a}{\lambda} = 1 + \frac{B_r}{H_c} \cdot \frac{\pi a f}{v}. \tag{8.12}$$

Seda arvestades saadakse taasestusvõimendi resulteerivaks sageduskarakteristikuks

$$K_2 = \frac{A_1}{f}\left(1 + \frac{B_r}{H_c} \cdot \frac{\pi a f}{v}\right) = \frac{A_1 B_r \pi a}{H_c v} + \frac{A_1}{f} =$$

$$= \frac{A_1 B_r \pi a}{H_c v}\left(1 + \frac{2 H_c v}{a B_r 2\pi f}\right) = K_0\left(1 + \frac{1}{2\pi f \tau_{ekv}}\right), \tag{8.13}$$

kus $K_0 = \pi A_1 B_r/(H_c v)$ ja $\tau_{ekv} = aB_r/(2H_c v)$.

Resulteeriv sageduskarakteristik teatud määral sarnaneb takistuse R ja mahtuvuse C jadalülituse näivtakistuse sageduskarakteristikuga

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C} = R\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega CR)^2}}, \tag{8.14}$$

kus $\tau = CR$ — lülituse ajakonstant. Valemite 8.13 ja 8.14 sarnasusest järeldub, et taasestusvõimendi sageduskarakteristik on sar-

nane sellise RC-jadalülituse sageduskarakteristikuga, mille ajakonstant

$$\tau = \tau_{ekv} = aB_r/(2H_c v). \qquad (8.15)$$

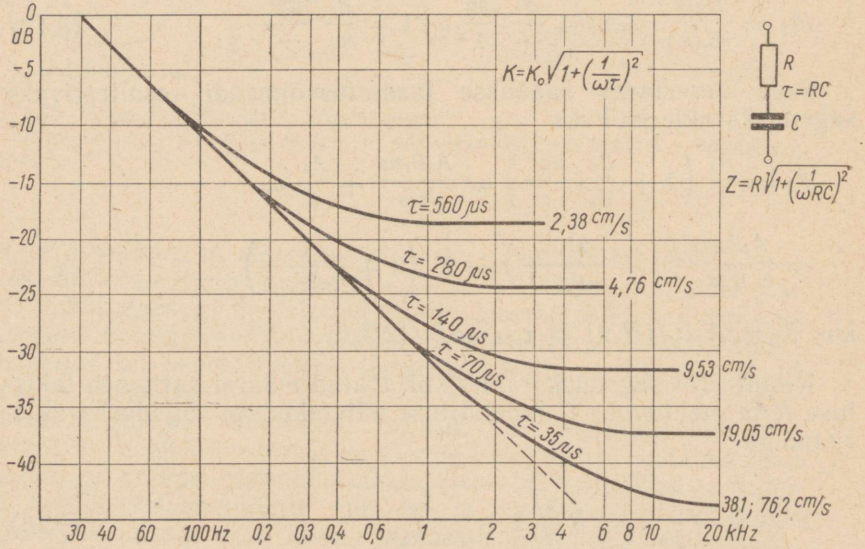
Et oleks võimalik vahetada helilinte erinevate maade ringhäälingute vahel, peab taasestusvõimendi sageduskarakteristik rahvusvahelise kokkuleppe kohaselt [114] võrduma RC-jadalülituse näivtakistuse sageduskarakteristikuga, kusjuures vastavalt lindi kiirusele peab RC-lüli ajakonstant olema järgmine (tabel 8.3).

Tabel 8.3

Standardsete sageduskarakteristikute ajakonstandid

Lindi kiirus v, cm/s	76,2	38,1	19,05	9,53	4,76	2,38
RC-lüli ajakonstant τ, µs	35	35	70	140	280	560
Lõikesagedus f_0, kHz	4,54	4,54	2,27	1,14	0,507	0,254

Samas tabelis on toodud ka nn. *lõikesagedus*, kus sageduskarakteristik erineb +3 dB võrra nii langevast kaldsirgest $1/f$ kui ka karakteristiku horisontaalosast, kus võimendus $K_2 = K_0$. Vastavad nn. *standardsed sageduskarakteristikud* on toodud joonisel 8.26.



Joon. 8.26. Taasestusvõimendite standardsed sageduskarakteristikud (ideaalse taasestuspea puhul)

Sellise karakteristikuga võimendi korrigeerib vaid *f*-tüüpi sagedusmoonutusi ja demagneetumiskadusid. Peale selle tuleb taasestusvõimendis korrigeerida veel taasestuspea piluefektist tingitud moonutusi. Näiteks lindikiirusel 19,1 cm/s ja taasestuspea pilu laiuse $\delta = 10$ μm puhul on sagedusel $f = 10$ kHz valemi 8.10 põhjal tegur $\mathrm{A} = \pi\delta f/v = \pi \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4/0{,}191 = 1{,}65$ ja vastav parandustegur

$$M_2 = \frac{1}{y_2} = \frac{\mathrm{A}}{\sin \mathrm{A}} = \frac{1{,}65}{\sin 1{,}65} = 1{,}65, \text{ s. o. } 4{,}4 \text{ dB}.$$

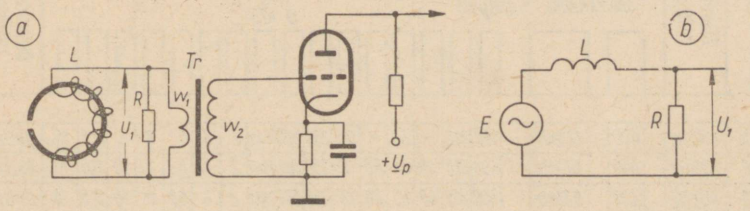
Taasestusvõimendi sageduskarakteristiku vastavus standardsele saavutatakse ajakonstandiga τRC-jadalülituse abil. Viimane on võimendi ühe astme koormuseks või on ühendatud tagasisideahelasse ($R_{21}R_{22}C_{18}$ joonisel 8.30). Piluefekti korrigeerimiseks kasutatakse kõrgetele helisagedustele häälestatud võnkeringi, mis on lülitatud kas mõne astme koormuseks või võimendi tagasisideahelasse (L_1C_{11} joonisel 8.30).

Stuudiomagnetofonide taasestusvõimenditel on tavaliselt pinget tõstev sisendtrafo (ülekandesuhtega $n = w_2/w_1 = 20 : 1 \ldots 60 : 1$) ja *f*-tüüpi sagedusmoonutused korrigeeritakse siin vastavalt joonisel 8.27.*a* toodud skeemile, mille tööpõhimõte on järgmine. Takistus R valitakse nii, et $R \approx 0{,}3 \cdot 2\pi fL$, kus f — kõige madalam töösagedus, L — pea induktiivsus. Siis aseskeemi (joon. 8.27.*b*) põhjal trafo sisendpinge

$$U_1 = \frac{RE}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}} \approx \frac{RE}{2\pi fL}, \tag{8.16}$$

s. t. on pöördvõrdeline sagedusega. Piluefekti arvestamata on peas indutseeritav emj. teatavasti (valem 8.9) võrdeline sagedusega: $E = 2\pi\omega\Phi_m f$, mis valemisse 8.16 asetatult annab võimendi sisendpingeks

$$U_1 = \frac{R}{2\pi fL} 2\pi w\Phi_m f = \frac{Rw\Phi_m}{L} = \text{const}. \tag{8.17}$$



Joon. 8.27. *f*-tüüpi moonutuste kompenseerimine stuudiomagnetofoni sisendahela abil:
a — skeem, *b* — aseskeem

Seega sisendpinge on võrdeline lindi magnetvooga, mida oligi vaja. Tavaliselt $R = 50 \ldots 100\ \Omega$.

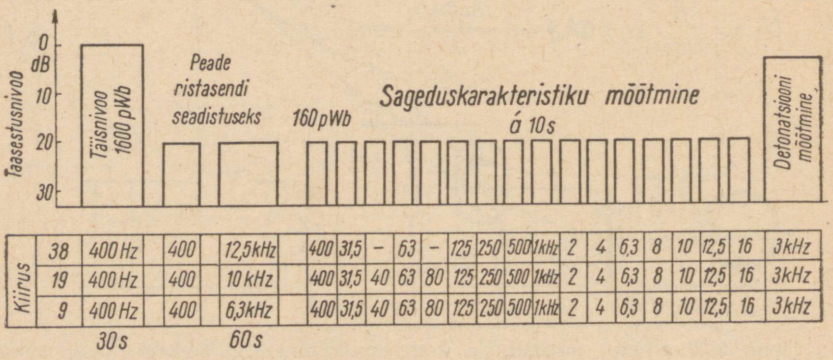
Piluefekti kompenseerimiseks sisaldab stuudiomagnetofon taasestusvõimendi kõrgetele helisagedustele häälestatud võnkeringi, mille abil toimub ühtlasi demagneetimiskadude kompenseerimine.

Korrektsioonid tuleb ette näha ka salvestusvõimendis. Nimelt kui kasutatud magnetlindi demagneetimiskaod erinevad standardsest, tuleb erinevus kompenseerida salvestusvõimendi sageduskarakteristikut vastavalt korrigeerides. Peale selle tuleb salvestusvõimendis korrigeerida salvestuspea poolt põhjustatud kaod kõrgetel sagedustel: hüstereesi- ja pöörisvoolukaod ning salvestuspea piluefektist tingitud kaod. Praktiliselt nõuab see salvestusvõimendis võimenduse suurendamist kõrgetel helisagedustel 6 ... 12 dB võrra. Selle saavutamiseks lülitatakse salvestusvõimendi tagasisideahelasse või ühe astme koormusahelasse rööpvõnkering.

Magnetofonivõimendid projekteeritakse ja arvutatakse vastavalt helisagedusvõimendite teoorias väljatöötatud meetoditele [109].

Taasestusvõimendi lõplik väljahäälestamine ja perioodiline kontrollimine toimub nn. *test- ehk etalonlindi* abil. Testlinte valmistatakse tehaste ja ringhäälingute jaoks vastavates uurimisinstituutides, kus etalonmagnetofonil salvestatakse lindile täisnivooga (0 dB) ja ka nivooga −20 dB rida sagedusi [94, 114]. Nende paiknemine testlindil on näidatud joonisel 8.28.

Kontrollsagedused sageduskarakteristiku mõõtmiseks on salvestatud selle arvestusega, et madalatel ja keskmistel sagedustel, kus lahtimagneetumist veel ei toimu, oleks lindi jääkmagnetvoog 160 pWb, kuid kõrgematel sagedustel väheneb täpses vastavuses rahvusvaheliselt normitud ajakonstandile. Samal lindil on veel täisnivoo (1600 pWb) sagedusega 400 Hz ja lõigud taasestuspea pilu ristasendi kontrollimiseks ning lindiveomehhanismi detonatsiooni mõõtmiseks (vt. § 1.9).



Joon. 8.28. Etalonsalvestuste paiknemine testlindil

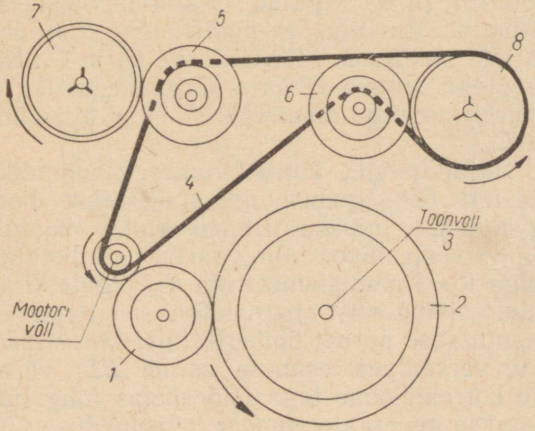
Taasestusvõimendi väljahäälestamiseks tehases taasestatakse magnetofonil testlint. Väljundpinge maksimumi järgi reguleeritakse pilu risti ja seejärel muudetakse korrektsioone võimendis, kuni saadakse maksimaalselt ühtlane sageduskarakteristik.

Seejärel reguleeritakse välja salvestusvõimendi heligeneraatori abil. Magnetofonile pannakse puhas, normaalse magnetkarakteristikuga lint. Salvestusvõimendi sisendisse ühendatakse heligeneraator ja taasestusvõimendi väljundisse lampvoltmeeter. Pärast eelmagneetimisvoolu ja täisnivoo reguleerimist (vt. § 8.2 ja 8.3) seadistatakse vastaval kõrgemal helisagedusel salvestuspea pilu paralleelseks taasestuspea piluga. Seejärel mõõdetakse magnetofoni sageduskarakteristik, ja reguleeritakse siis salvestusvõimendi korrektsioonielemente seni, kuni saadakse taasestusvõimendi väljundis sama sageduskarakteristik kui testlindi puhulgi.

Stuudiomagnetofone kontrollitakse testlindi ja heligeneraatoriga perioodiliselt, vähemalt kord nädalas.

8.8. MAGNETOFON «DAINA»

Magnetofon «Daina» (Э-29) [110, 85] on Vilniuse elektrotehnikatehases «Elfa» toodetav kantav kaherealise salvestusega III klassi laiatarbemagnetofon. «Daina» tehnilised põhiandmed: lindi kiirus 9,53 cm/s ja 2,38 cm/s ning sageduskarakteristik vastavalt 40 ... 12500 Hz või 150 ... 3500 Hz; kasutades lindipoole nr. 18, mis mahutavad 350 m normaalpaksusega (55 μm) linti, on salvestuskestus 2×60 min. kiirusel 9,53 cm/s ja 2×240 min. kiirusel 2,38 cm/s; müranivoo −44 dB; detonatsioon kuni 0,3% kiirusel 9,53 cm/s ja kuni 5% kiirusel 2,38 cm/s; maksimaalne väljundvõimsus 1,5 W; toide 220 või 127 V, 50 Hz; tarbitav võimsus 70 W; mõõtmed 370×240×155 mm; kaal 10 kg.



Joon. 8.29. Magnetofoni «Daina» kinemaatikaskeem (pealtvaade)

Lindiveomehhanism. Kahefaasiline asünkroonmootor КД-3,5 käitab parasiitratta *1* kaudu (joon. 8.29) massiivset hooratast *2* koos toonvõlliga *3* ja kummirihma *4* abil hõõrderataste *5* ja *6* kaudu poolialused *7* ning *8*. Mootori teise faasimähise w_2 jaoks vajalik faasinihe 90° saadakse faasinihkeahela C_7R_9 abil (joon. 8.30). Mootori võllile kinnitatud pealmik *9* on lindikiiruse 9,53 cm/s jaoks. Kiiruse 2,38 cm/s saamiseks lülitatakse parasiitratas *1* otsesesse kontakti mootori võlliga. Diferentsiaalne piduritesüsteem tagab mehhanismi sujuva pidurdamise ning väldib magnetlindil aasade tekkimise või väljavenimise.

Elektriline skeem (joon. 8.30). Esimeses astmes kasutatakse miniatuurset metallokeraamilist lampi — nuvistori — tüüp 6C62H [15, 107], mis on väikese omamüraga ja vibratsioonikindel.

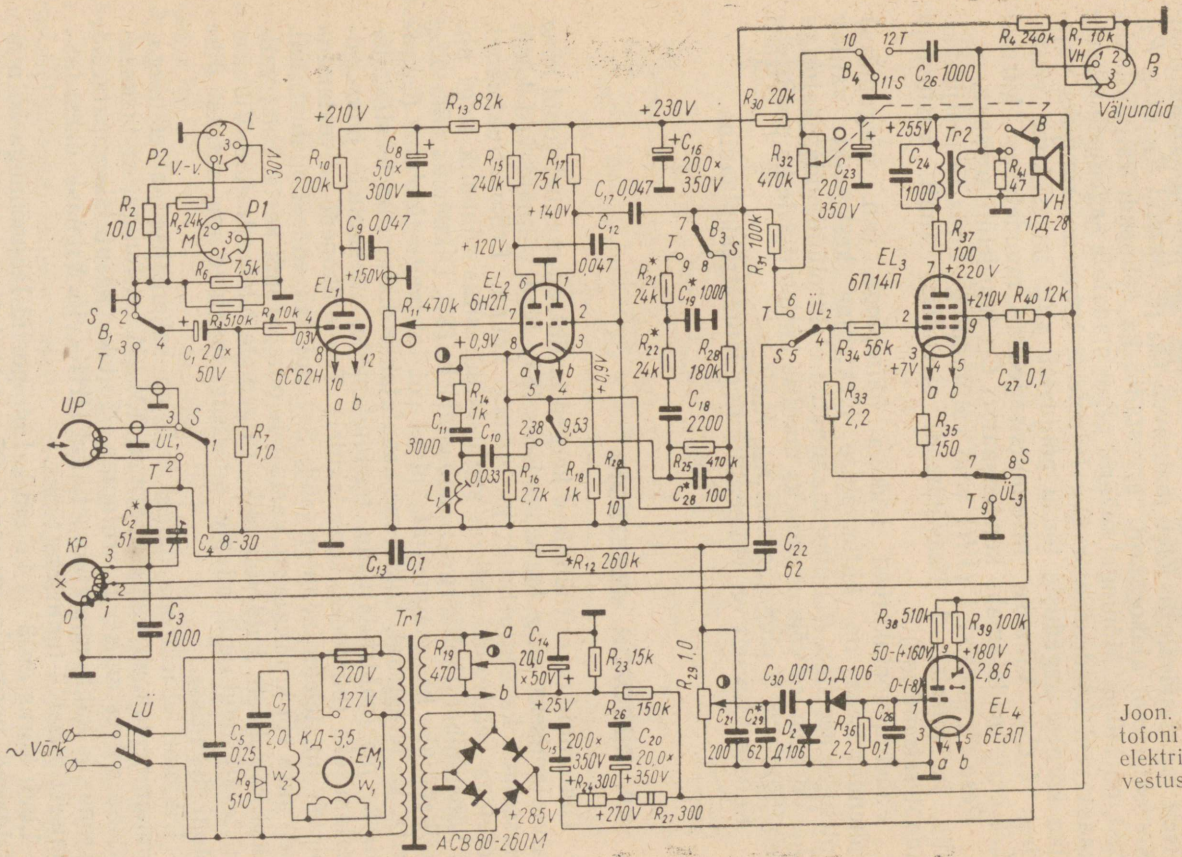
Salvestusrežiimis antakse lambi võrele helisageduslik pinge kas mikrofonist (läbi pistikupesa P_1 kontakti *1*), raadiovastuvõtja detektori väljundist või siis raadiotranslatsioonivõrgust (pesa P_2 kontaktid *1* ja *3*, pesa P_1 kontakt *3*).

Nuvistorastme väljund on salvestusnivoo regulaatori R_{11} kaudu ühendatud järgneva kaheastmelise helisagedusvõimendi sisendiga. Võimendis kasutatakse trioodi 6Н2П, mis salvestusrežiimis on hõlmatud negatiivse tagasisidega läbi R_{28}. Kõrgete helisageduste võimendust korrigeeritakse jadavõnkeringiga L_1C_{11} (esimese astme katoodahelas). Korrektsiooni suurus reguleeritakse välja tehases potentsiomeetriga R_{14}. Lindi kiirusel 2,38 cm/s vähendatakse võnkeringi resonantsisagedust kondensaatori C_{10} juurdelülitamisega.

Universaalpead *UP* läbiva helisagedusliku salvestusvoolu suurus (täisnivoo) reguleeritakse välja tehases eeltakistiga R_{12}. Kõrgsagedusliku ($f=70$ kHz) eelmagneetimis- ja kustutusvoolu generaatorina töötab võimsuspentood 6П14П nn. *induktiivses kolmpunktlülituses*. Generaatori võnkeringi induktiivsusena kasutatakse kustutuspea *KP* kahe väljavõttega mähist. Mähise algus *0* on maandatud; esimene väljavõte *1* on ühendatud generaatorlambi katoodiga ja teine *2* võrega. Sellega on tagatud vajalik tagasisidestus ja generaatori iseergutumine. Kustutuspea mähise lõpp *3* on ühendatud universaalpeaga läbi sidestuskondensaatorite C_2 ja C_4. Neist viimane on trimmer, millega toimub tehases kõrgsagedusliku eelmagneetimisvoolu reguleerimine optimaalseks. Generaatori võnkeringi mahtuvuseks on C_3.

Salvestusvõimendi väljundpinget kontrollitakse nivooindikaatoriga (lamp *EL4*). Selleks helisageduspinge alaldatakse dioodidega D_1 ja D_2 ning antakse indikaatorlambi (nn. «maagilise silma») 6Е3П võrele. Salvestusnivoo nimiväärtus seadistatakse tehases potentsiomeetriga R_{29}. Potentsiomeetriga R_{32} reguleeritakse siseneva programmi kuulamistugevust magnetofoni seisu ajal.

Sama võimendit kasutatakse pärast ümberlülitusi taasestuseks. Selleks ühendatakse universaalpea esimese astme EL_1 võrega, lülitiga B_3 muudetakse korrektsioone tagasisideahelas ning lülititega $\ddot{U}L_2$ ja $\ddot{U}L_3$ lülitatakse generaator ümber helisageduse võim-



Joon. 8.30. Magnetofoni «Daina» elektriskeem (salvestusrežiimis)

susvõimendiks. Taasestusnivood reguleeritakse potentsiomeetriga R_{11}. Helitämbri regulaatoriks on R_{32}, mis on C_{26} kaudu lülitatud võimsusvõimendi tagasisideahelasse. Soovi korral saab valjuhääldi välja lülitada lülitiga B, mis on ühisel võllil potentsiomeetriga R_{32}.

Taasestusvõimendi sageduskarakteristikut korrigeerivad põhiliselt tagasisideahelas olev mahtuvus C_{18} ja takistid R_{22} ning R_{21}. Korrektsiooni ajakonstant, arvestades ka võimendi väljundtakistust, on 140 μs. Mõningal määral aitab madalate sageduste tõusule kaasa veel kondensaator C_{19}. Piluefekti kompenseerimiseks vajaliku kõrgete sageduste tõusu põhjustab siin järjestikune võnkering L_1C_{11}. Viimase resonantssagedus muudetakse kiirusel 2,38 cm/s madalamaks kondensaatori C_{10} juurdelülitamisega.

Pesa P_3 puksist *1* (*VH*) võib väljundpinge anda lisavaljuhääldile ja puksist *3* lisavõimendi sisendisse (näit. vastuvõtja adaptersisendisse).

Vahelduvvooluküttest tekkiva häirepinge (nn. võrgumüra) vähendamiseks on küttemähise elektriline keskpunkt valitav potentsiomeetriga R_{19} ning maandatud elektrolüütkondensaatoriga C_{14}. Võrgumüra vähendamiseks antakse kütteniitidele ka positiivne eelpinge +25 V pingejagurist R_{26}, R_{23}.

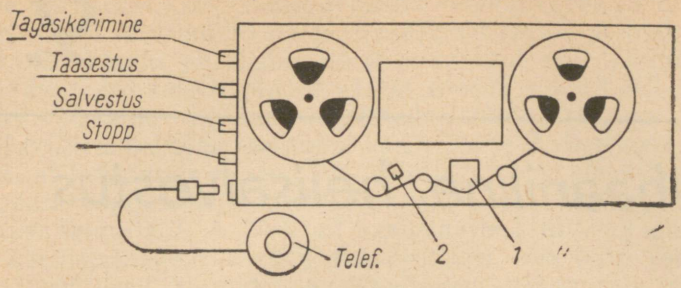
Konstruktiivselt on võimendi kujundatud trükkplaadina.

8.9. DIKTOFON «ELEKTRON»

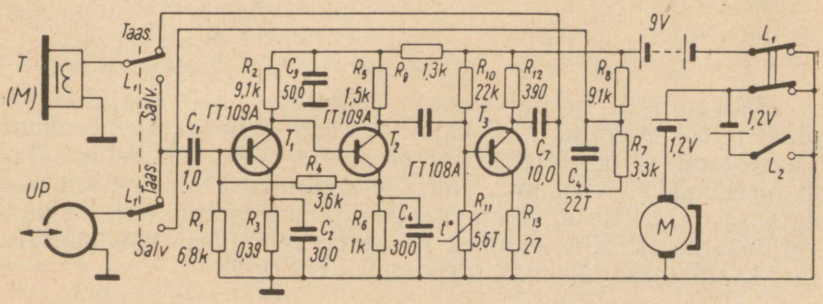
Diktofonid on eritüübilised kerged ja lihtsad magnetofonid kõne salvestamiseks ning taasestamiseks [83]. Nad võimaldavad kõnet taasestada ka aeglustatult ja lõikude kaupa. Erikonstruktsiooni, pöörleva peadeploki abil on aeglustatud esitus võimalik isegi nii, et kõnetämber (helikõrgus) jääb endiseks [33]. Diktofonis võib olla helikandjaks kas magnetlint, -plaat või lai magnetfoolium (-mansett), ka terastraat. Diktofone kasutatakse dikteeritud teksti esitamiseks masinakirjutajatele, telefonikõnede, ettekannete jms. salvestamiseks (büroodes, koosolekutel). Telefonikõnede salvestamine toimub nn. telefoniadapteri abil. See kujutab endast mähist, mis surutakse või kinnitatakse vastu telefoniaparaadi kesta. Koht valitakse katseliselt, kuid võimalikult ligemale telefonitrafole. Viimase puisteväli indutseerib adapteris helisageduspinge, mis antakse diktofoni sisendisse.

Diktofon «Elektron» mudel 52Д on kaherealise salvestusega. Kuulamine toimub kuuldeaparaadi ТМ-2М telefoniga, mida kasutatakse salvestamisel mikrofonina. Toiteks kasutatakse patareid «Krona» ja kahte miniatuurset akut ЦНК-0,45. Viimaste ühest laadimisest piisab 4-tunniseks tööks.

Lindi kiirus on 3 ... 4,5 cm/s. Lindipoolid läbimõõduga 50 mm sisaldavad normaalpaksusega (37 μm) linti salvestuskestusega 2×9 min. või õhukest linti (18 μm) salvestuskestusega 2×15 min.



Joon. 8.31. Diktofoni «Elektron» välisvaade



Joon. 8.32. Diktofoni «Elektron» skeem (taasestusrežiimis)

Sagedusriba on 300 ... 3500 Hz ebaühtlusega 16 dB. Diktofoni mõõtmed 160×65×43 mm, mass alla 500 g.

Diktofoni käsitsemine toimub otspinnal asuvate surunuppude abil (joon. 8.31). Samal joonisel on näidatud ka universaalpea *1* ja kustutusmagnet *2*.

Diktofoni põhimõtteskeem on joonisel 8.32. Taasestusrežiimis on universaalpea *UP* ühendatud sidestuskondensaatori C_1 kaudu esimese võimendusastme transistori T_1 baasiga. Võimendi kaks esimest astet on otsesidestuses ning hõlmatud negatiivse tagasisidega läbi R_4, mis ühtlasi stabiliseerib T_1 ja T_2 alalisvoolurežiimi. Lõppaste T_3 on koormatud miniatuurse telefoniga *T*.

Salvestusrežiimi lülitatakse võimendi ümberlülitiga L_1, mis ühendab võimendi sisendisse mikrofonina kasutatava telefoni *T* ja väljundisse universaalpea *UP*. Salvestus toimub siin alalis-eelmagneetimisega, milleks vajalik vool saadakse läbi eeltakisti R_8. Lindi kiirendatud tagasikerimiseks suletakse L_2 (kusjuures automaatselt avaneb L_1) ja mootorit toidetakse kõrgendatud pingega.

Teisele helireale salvestamiseks tuleb pleksiklaasist kaitseklaas avada ja lindipoolid omavahel ära vahetada.

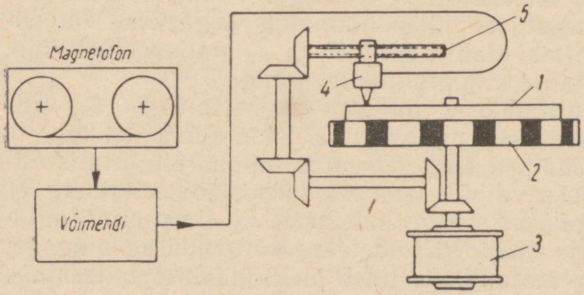
9.

Mehaaniline helisalvestus

Mehaanilisel helisalvestusel lõigatakse helikandjasse (heliplaati) looklev vagu, mis kujult kordab õhuosakeste võnkumist. Taasestamiseks asetatakse vaosse nõelateravik, mis helikandja liikumisel hakkab võnkuma. Nõela mehaanilised võnkumised muundatakse elektriliseks, võimendatakse ja salvestatud heli on kuulda valjuhääldajas. Kinotehnikas kasutatavat nn. optilist helisalvestust käsitletakse lähemalt kirjanduses [12, 122].

9.1. MEHAANILISE HELISALVESTUSE TEHNIKA

Heliplaatide valmistamisel lõigatakse esimene originaal nn. plaadilõikepingil (joon. 9.1) vahataolisest materjalist paksule plaadile *1*. Plaat on kinnitatud alusele *2*, mille paneb ühtlaselt pöörlema elektrimootor *3*. Pöörlemiskiirust kontrollitakse stroboskoobiga. Vagu lõigatakse plaadile lõikepeaga ehk rekorderiga *4*.



Joon. 9.1. Plaadilõikepingi skeem

mille mähisesse antav helisageduslik vahelduvvool paneb võnkuma terasest või safiirist lõiketera. Plaadi pöörlemisel pannakse koonusülekande kaudu pöörlema ka keermetatud võll 5, mis nihutab rekorderit radiaalselt plaadi äärest tsentri poole. Nii lõigatakse plaati spiraalne vagu, mis lõpetatakse suletud ringiga.

Tavaliste heliplaatide puhul kasutatakse E. Berlineri poolt juba 1887. a. kasutusele võetud nn. külglõiget ehk põiksalvestust, kus lõiketera võngub horisontaalselt, risti vaole. Mehaanilise helisalvestuse leiutaja T. A. Edisoni fonograafis (1877. a.) oli kasutusel nn. vertikaallõige ehk süvasalvestus, kus lõiketera võnkus ülesalla. Tavalistel plaatidel vertikaallõiget ei kasutata, sest plaadi sügavusse liikudes kohtab lõiketera suuremat takistust, mis põhjustab mittelineaarmoonutust. Küll aga kasutatakse vertikaallõiget stereoplaatidel. Nimelt lõigatakse siin vasaku ja parema kanali vahe, nn. diferentssignaal, sisse vertikaalvõnkumistena, kanalite summa aga külgvõnkumistena. Viimane asjaolu tagab stereoadapteri pööratavuse ehk ühitatavuse, s. t. võimaldab stereofoonilise helipeaga taasestada ka tavalisi kauamängivaid (monofoonseid) heliplaate.

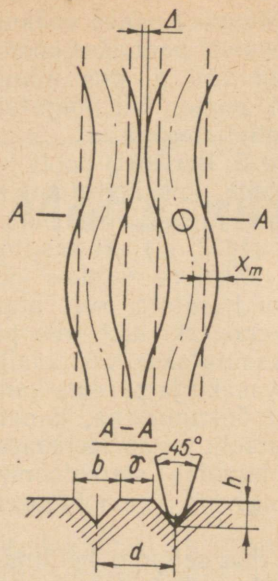
Lõige vahale toimub heliplaaditehases magnetofoni helilindilt, kus on viimistletud ja hoolikalt monteeritud salvestus.

Vahalõikest tehakse matriits, millega pressitakse müügile tulevad heliplaadid. Matriits valmistatakse galvanosteegiliselt järgmiselt. Vahaplaat kaetakse keemilisel teel üliõhukese hõbedakihiga või pihustatakse sellele vaakumis mõne aatomi paksuselt kulda, et muuta pind elektrit juhtivaks. Siis kaetakse plaat galvanosteegilises vannis vasekihiga. Nii saadakse metallkoopia — negatiiv — kus vao asemel on spiraalne vallseljak. See on nn. esimene originaal, millest plaatide tiraaži suurendamiseks tehakse veel mitu metallpositiivi (teised originaalid). Alles viimastest tehtud negatiive (kolmandad originaalid), mis kulumiskindluse suurendamiseks on kaetud kroomikihiga, kasutatakse matriitsidena, mille igaühega saab pressida umbes 1000 vinüliidist (polüvinüülkloriidist) heliplaati.

9.2. VAOSAMMU JA TAASESTUSNÕELA MÕÕTMED

Joonisel 9.2 on kujutatud kaks naabervagu pealtvaates ja ristlõikes. Tavalisel heliplaadil on vagu pealt 140 μm lai, põhja ümardusraadius on 25 μm ja vaosamm $d \approx 260$ μm. Selliseid plaate enam ei valmistata. Kauamängivatel plaatidel (mikrolõige) on vao laius pealt 55 μm (stereoplaadil 45 μm), põhja ümardusraadius 7,5 μm (5 μm) ja vaosamm $d \approx 100$ μm. Vao nõlvade kalle on 45°.

Et naabervaod ei lõikuks, ei tohi lõiketera amplituud x_m (maksimaalne kõrvalekalle keskasendist) ületada tavalisel plaadil 55 μm ja mikrolõikel ning stereoplaadil 20 μm. Siis jääb maksimaalse salvestusnivoo puhul naabervagude minimaalseks kauguseks



Joon 9.2. Helivaod pealtvaates ja lõikes

$\Delta \approx 10$ μm (joon. 9.2). Plaatide läbimõõdud ja pöörlemiskiirused on normitud ning toodud tabelis 9.1 [95, 125].

Tuleb märkida, et vaosamm pole riiklikes standardites rangelt ette kirjutatud, mistõttu plaadi mängukestuse suurendamiseks võiks lõigata väiksema vaosammuga. Nimelt plaadi mängukestus

$$T = \frac{R_{max} - R_{min}}{nd},$$

kus R_{max} ja R_{min} on vastavalt algus- ja lõpuvao kaugus plaadi tsentrist, n — plaadi pöörlemiskiirus ja d — vaosamm. Kuid vaosammu vähendamisel tuleb vähendada ka lõiketera amplituudi, mis vähendab salvestuse dünaamikapiirkonda ja kvaliteeti. Väljapääs seisneb muutuva vaosammu kasutamises. Siin spetsiaalne süsteem tüürib rekorderi liikumist vastavalt salvestatava signaali amplituudile. Piaano (ja pausi) ajal on vaosamm

Tabel 9.1

Heliplaatide tehnilisi andmeid

Suuruse nimetus	Tavaline heliplaat	Kauamängiv ja stereoplaat
Plaadi välisläbimõõt cm	20; 25	17,5; 25; 30
Algus- ja lõpuvao müratase dB		—54; —53; —51
Pöörlemiskiirus n, p/min	78	33¹/3; 45
Taasestusnõela otsa ümardusraadius r_n, μm	55...70	M 18...26 St 13...18 (M+St) 16...19
Nõela maksimaalne lubatav koormus plaadile mN	120	M 120; St 40 (M+St) 70
Salvestustihedus (vagude arv 1 cm kohta)	~38	~100
Vaosamm d, μm	260	100
Vao laius pealt μm	140	55; St 45
Vao põhja ümardusraadius r_v, μm	25	7,5; St 5
Lõiketera maksimaalne võnkeamplituud x_m, μm	55	20

väiksem ning salvestustihedus suurem, suurte amplituudide ajal aga säilib vaosamm normaalsena. Muutuvat vaosammu kasutatakse mikro- ja eriti stereolõike puhul ning see võimaldab plaatide mängukestust suurendada 20...25% võrra.

Taasestusnõelad (grammofoninõelad) valmistatakse tehiskorundist [96, 125] ning vajavad vahetamist alles 50...100 töötunni järel, erinedes seega tunduvalt varem kasutatud terasnõeltest, mida tuli vahetada iga plaadi järel. Tehisteemandist nõelad on veelgi vastupidavamad. Nõelte pikkus on 1,2...1,5 mm ja läbimõõt 0,4 mm. Nõela teravik on koonusekujuline, kusjuures moodustaja ja telje vaheline nurk on 22,5° (joon. 9.2). Teraviku ots peab olema poleeritud ja ümardusraadiusega vastavalt tabelile 9.1. Tabelis on toodud ka nõela maksimaalne koormus plaadile.

Nõela tüüpi tähistatakse vastava materjali algustähega ja otsa ümardusraadiusega. Näiteks tüüp K19 tähistab korundnõela, otsa ümardusraadiusega 19 μm.

Plaadile salvestatavate helisageduste piirid on 50...10 000 Hz ja mittelineaarmoonutus sagedustel 100...3000 Hz mitte üle 1,5% [95, 125].

Vao joonkiiruseks nimetatakse kiirust, millega vagu jookseb nõela alt läbi. See arvutatakse valemiga

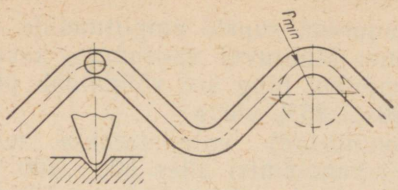
$$v_v = \frac{2\pi R_v n}{60},$$

kus R_v — vao kaugus plaadi tsentrist (raadius), n — plaadi pöörlemiskiirus. Joonkiirus on minimaalne sisemisel vaol, mistõttu seal halveneb kõrgete helisageduste ülekanne. Seepärast sisemise vao kaugus plaadi tsentrist ei tohi olla väiksem järgmistest suurustest:

Plaadi pöörlemiskiirus n, p/min	78	45	33⅓
Sisemise vao raadius R_{min}, mm	95	106	120
Minimaalne joonkiirus v_{min}, m/s	0,375	0,25	0,209

9.3. LÕIKETERA VÕNKEAMPLITUUD JA -KIIRUS. HELILÕIKE SAGEDUSKARAKTERISTIK

Lõiketera võnkeamplituud ja ka helivao kõrvalekalle keskasendist on võrdeline helitugevusega. Seejuures muusikapala maksimaalse helitugevusega kohtades ei tohi vao kõrvalekalle s_{max} ületada suurimat lubatavat väärtust, mis kauamängivatel ja stereoplaatidel on 20 μm. Heliallikate statistilis-dünaamiliste spektrite põhjal (§ 1.8, joon. 1.9) on maksimaalset helitugevust oodata sagedustel 100...3200 Hz. Järelikult peaks lõikepea (lõiketera) võnkeamplituudi sageduskarakteristik olema neil sagedusil konstantne. Kuid selle tingimuse täitmisel oleks sagedustel üle 1000 Hz



Joon. 9.3. Helivao minimaalne kõverusraadius lookleva vao tipus

helivao kõverusraadius väiksem taasestusnõela teravikust, tekiks nn. nõela kinnikiilumine ja kõrgeid helisagedusi talletav vao peenstruktuur purustataks. Nõel ei järgiks enam vao looklemist ning kõrgete helisageduste taasestamine halveneks tunduvalt. Helivao minimaalne kõverusraadius tekib siinuseliselt lookleva vao tipus (joon. 9.3) ja arvutatakse valemiga [56, 133]

$$r_{min} = \frac{v_{min}^2}{4\pi^2 s_{max} f^2} = \frac{R_{min} n^2}{s_{max} f^2}, \tag{9.1}$$

kus $v_{min} = 2\pi R_{min} n$ — vao minimaalne joonkiirus, R_{min} — plaadi sisemise vao raadius. Võrdsustades minimaalse kõverusraadiuse nõela ümardusraadiusega r_n, saadakse ülemiseks piirsageduseks

$$f_{max} = \frac{v_{min}}{2\pi\sqrt{s_{max} r_n}}. \tag{9.2}$$

Halvim on olukord pöörlemiskiirusega $n = 33^1/_3$ p/m plaatide puhul, kus $v_{min} = 0{,}209$ m/s. Nõela A26 puhul oleks siis ülemiseks piirsageduseks 1,45 kHz.

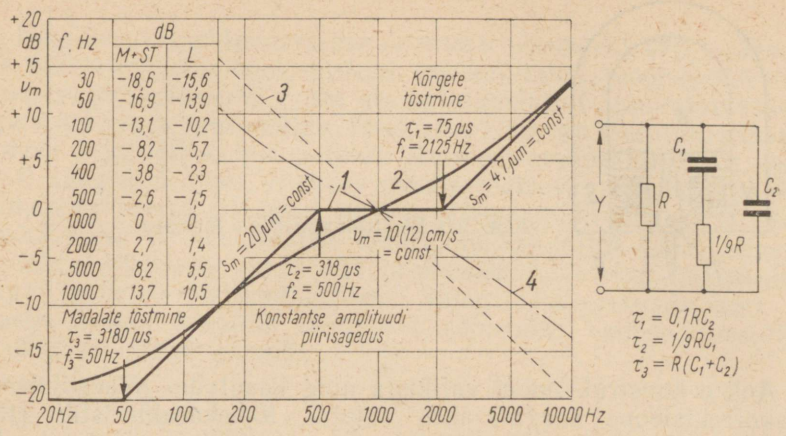
Rahvusvaheliselt on normitud, et lõige konstantse amplituudiga toimub kuni sageduseni 500 Hz. Et võnkekiirus on paigutuse tuletis, siis siinuselise võnkumise võnkekiiruse amplituud on valemi 1.2 põhjal

$$v_m = \omega s_m = 2\pi f s_m, \tag{9.3}$$

kus s_m — paigutuse amplituud. Lõiketera võnkekiiruse amplituudi v_m nimetatakse lõikekiiruseks. Viimasest valemist järeldub, et kui s_m on konstantne, suureneb lõikekiirus võrdeliselt sagedusega (joon. 9.4). Sagedusvahemikus 500 ... 2125 Hz toimub lõige konstantse kiirusega. Valemist 9.3 järeldub, et

$$s_m = \frac{v_m}{\omega} = \frac{v}{2\pi f}, \tag{9.4}$$

s. t. maksimaalne lubatav amplituud väheneb võrdeliselt sagedusega ja sagedusel $f_1 = 2125$ Hz on 4,7 μm. Et parandada signaali ja müra suhet kõrgetel sagedustel, toimub lõige sagedusest 2125 Hz kõrgematel sagedustel konstantse amplituudiga. Kuna kõrged



Joon. 9.4. Lõikekiiruse standardne sageduskarakteristik

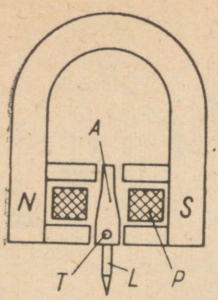
sagedused on heliallikate spektrites suhteliselt nõrgemad (joon. 1.9), pole siin oodata suuri võnkeamplituude ega teki nõela kinnikiilumist vao ülemäära väikese kõverusraadiuse tõttu.

Joonisel 9.4 kujutatud järskude murdekohtadega ideaalse karakteristikuga (kõver *1*) lõikeseadet on praktikas võimatu konstrueerida. Seepärast on rahvusvaheliselt ja riikliku standardiga [95] kehtestatud sujuvate üleminekutega karakteristik *2*. See läbib sagedusel 1000 Hz kiiruse suhtelise nivoo 0 dB ja vastab samal joonisel 9.4 kujutatud *RC*-lülituse juhtivuse sõltuvusele sagedusest ning analüütiliselt avaldub valemiga

$$v_m = 10 \log \left[(1 + \omega^2\tau_1^2) \left(\frac{\omega^2\tau_2^2}{1 + \omega^2\tau_2^2} \right) \left(\frac{1 + \omega^2\tau_3^2}{\omega^2\tau_3^2} \right) \right] \text{dB}, \qquad (9.5)$$

kus ajakonstandid $\tau_1 = 75$ µs, $\tau_2 = 318$ µs ja $\tau_3 = 3180$ µs on murdekohtadele vastavate nurksageduste pöördväärtused ning $\omega = 2\pi f$. Tavalisel (laiavaolisel) heliplaadil on alumine murdesagedus f_3 samuti 50 Hz, kuid $f_1 = 3200$ Hz ja $f_2 = 354$ Hz; ajakonstantidele $\tau_1 = 50$ µs ja $\tau_2 = 354$ µs vastava standardse lõikekarakteristiku punktid on toodud joonisel 9.4 oleva tabeli veerus *L*.

Mehaanilise helisalvestuse lõikepead (rekorderid) on elektromagnetilist tüüpi (§ 3.3), diferentsiaalsüsteemilised (joon. 9.5). Püsimagneti NS poolustevahelises õhupilus paikneb siin ankur *A*, mis võib võnkuda ümber oma kinnitustelje *T*. Ankru külge on kinnitatud lõiketera *L*. Ankrut ümbritseb paigalseisev ergutuspool *P*, mis on paigutatud poolusekingadesse. Pooli läbiv helisageduslik vahelduvvool magneedib ankrut vahelduvasuunaliselt, mistõttu see hakkab võnkuma poolusekingade vahel helisageduse taktis. Joonisel pole näidatud vedru, mis püüab hoida ankrut keskasendis.



Joon. 9.5. Elektromagnetiline lõikepea

Ankru konstruktsiooni valikuga ning kasutades lõikevõimendis lisakorrektsioone saavutatakse vajalik lõikekarakteristik [133]. Reaalse lõikepea karakteristik ei tohi erineda joonisel 9.4 toodud kõverast *2* mitte üle ±2 dB, kui karakteristikud on pandud ühtima sagedusel 1000 Hz.

Lõikekiiruse amplituudi mõõtmine toimub äärmiselt lihtsa optilise meetodiga, mida esmakordselt kasutasid Buchmann ja Meyer 1930. a. [56]. Nimelt lastakse paralleelsete valguskiirte kimp langeda plaadile. Valgus peegeldub vagude seintelt, kusjuures plaadil tekib raadiuse sihis nn. peegeldusjälg, mille laius on võrdeline lõikekiirusega. Hoides plaati vähemalt 50 cm kaugusel silmast, mõõdetakse peegeldusjälje laius (risti plaadi raadiusega) kas sirkliga või sentimeeterskaalaga joonlauaga. Peegeldusjälje laius b ei sõltu salvestatud sagedusest ning vastav lõikekiirus arvutatakse valemiga

$$v_m = \frac{\pi n b}{60}, \tag{9.6}$$

kus n on plaadi pöörlemiskiirus p/min. Meetod on teatud erinevustega kasutatav ka stereoplaatide juures [55].

Lõikekiiruse amplituud ei tohi ületada tabelis 9.2 toodud väärtusi. Samas on toodud ka vastavad peegeldusjälje laiused.

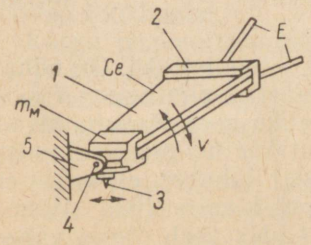
Tabel 9.2

Plaadi lõikekiirus ja vastav peegeldusjälje laius

Plaadi pöörlemiskiirus n, p/min	Suurim lubatav lõikekiirus v_m, cm/s		Suurim lubatav peegeldusjälje laius b, mm
	Mono	Stereo	Mono
33⅓	10	7	60
45	12	8,5	50
78	16	—	40

9.4. HELIPLAADI TAASESTUS

Käesoleval ajal kasutatakse enamasti piesoelektrilisi taasestus- ehk helipäid, mille võnkesüsteem on kujutatud joonisel 9.6. Siin bimorfse piesoelemendi *1* üks ots on liikumatult kinnitatud klambriga *2* helipea korpuse külge. Teise otsa külge on kinnitatud taasestusnõel *3* ja võll *4*, mis paikneb elastsest materjalist (näit. kummist) laagris *5*. Nõel, liikudes mööda looklevat helivagu, hakkab võnkuma nooltega näidatud sihis ja põhjustab piesoelemendi väändevõnkumise *V*. Mehaanilise deformatsiooni tõttu tekib elemendi pinnale elektrilaeng (vt. § 3.2) ja plaatide hõbetatud välispindade külge joodetud väljundjuhtmete vahel helisageduslik emj. *E*. Elastne laager *5* väldib nõelaotsa riknemise helipea juhuslikul kukkumisel plaadi pinnale.



Joon. 9.6. Piesoelektrilise helipea võnkesüsteem

Võnkesüsteemi resonantsisagedus on siin viidud kõrgemale ülemisest sageduspiirist (10 kHz), mistõttu süsteem töötab allpool resonantsisagedust. Süsteemi mehaaniline takistus on elastse iseloomuga ja taandatult nõela teravikule arvutatav valemiga

$$z = \frac{1}{j\omega C_M},$$

kus C_M — võnkesüsteemi elastsus, taandatult nõela teravikule. Tavaliselt $C_M \approx 2{,}5$ mm/N.

Nõela teraviku poolt vao nõlvale suunatud jõud

$$F_m = zv_m = \frac{v_m}{j\omega C_M}. \qquad (9.7)$$

Kui lõikekiirus on võrdeline sagedusega, siis nõela vastureaktsioon ja vao kulumine ei sõltu sagedusest. Tänu sellele plaadi sageduskarakteristik ei moonutu plaadi kulumisel.

Helipea väljundtakistus on mahtuvuslik (nagu kondensaator- ja piesoelektrilisel mikrofonilgi) ning võrdub hõbetatud pindade vahelise mahtuvusega C_0. Koormamata helipea väljundpinge e. emj. E on arvutatav elektromehaanilise sideteguri z_{12} kaudu (valem 3.52) järgmiselt:

$$E = v_m z_{12} = \frac{v_m \Pi A}{j\omega}. \qquad (9.8)$$

Kui lõikekiirus on võrdeline sagedusega, siis helipea emj. $E = \text{const}$. ja ei sõltu sagedusest.

Takistusega R_k koormatud helipea väljundpinge arvutatakse samuti nagu kondensaatormikrofoni puhul (valem 4.34):

$$U_{välj} = \frac{j\omega C_0 R_k}{1 + \omega R_k C_0} E. \tag{9.9}$$

Koormustakistus tuleb valida küllalt suur, nii et tööpiirkonnas $\omega C_0 R_k \gg 1$; siis $U_{välj} \approx E$.

Helipea tundlikkuseks nimetatakse väljundpinge ja lõikekiiruse jagatist. Piesoelektrilise helipea tundlikkus

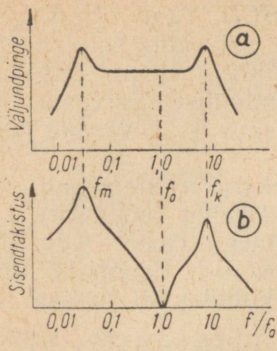
$$\varepsilon_p = \frac{U_{välj}}{v_m} \frac{E}{v_m} = \frac{\Pi A}{j\omega} \text{ V·s/m}. \tag{9.10}$$

Seda seost kujutab langev punktiirsirge *3* joonisel 9.4. On näha, et tundlikkus erineb mõnevõrra ideaalsest (kriips-punkt-joon *4* joonisel 9.4), mis on teatavasti lõikekarakteristiku peegelkujutis nivoo 0 dB suhtes. Vajalik karakteristik saavutatakse helipea võnkesüsteemi parameetrite valikuga. Maksimaalselt lubatav erinevus ei tohi ületada $\pm(4 \ldots 6)$ dB, sõltuvalt helipea klassist [93]). Monofooniliste helipeade tundlikkus sagedusel 1 kHz peab olema vähemalt 50 mV · s/cm, stereofoonilistel 70 mV · s/cm.

Elektromagnetiline helipea on konstruktsioonilt sarnane lõikepeaga (joon. 9.5) ja töötab elektromagnetilise muundurina generaatorirežiimis (vt. § 3.3). Elektromagnetilise helipea väljundpinge on umbes 10 korda väiksem kui piesoelektrilisel peal ja võrdeline lõikekiirusega (valem 3.39), mistõttu nõuab suuremat võimendust ja vastavate korrektsioonide kasutamist taasestusel. Eelvõimendi paigutatakse harilikult plaadiseadmesse helipea väljaviikude juurde [139].

Piesoelektrilisele helipeale on iseloomulikud kolm omaresonantsisagedust, mis paiknevad madalatel, keskmistel ja kõrgetel sagedustel (joon. 9.7). Madalatel sagedustel annab vastavalt valemile 3.6 resonantsi f_m piesoelemendi elastsus C_e ja läbi selle käitatav helipea kogumass m. Taolisele, mehaaniliste elementide jadalülitusele (vt. joon. 3.5.*c*) on valemi 3.8 põhjal elektriliseks analoogiks rööpvõnkering (joon. 3.5.*d*), mille sisendtakistus on suur (vt. valem 3.10). Seepärast on sellel resonantsisagedusel f_m helipea sisendtakistus suur, s. t. nõelateraviku väike paigutus vajab suurt jõudu, kusjuures nii piesoelemendi kui ka helipea enda võnkeamplituudid on suured. Suure mittelineaarmoonutuse ning helivao tugeva kulumise, isegi riknemise vältimiseks on see resonantsisagedus f_m viidud allapoole ülekandeala, sagedusele ca 30 Hz.

Keskmine resonantsisagedus f_0 (joon. 9.7) on põhjustatud nõela ja selle hoidja massist $(m_N + m_H)$ ning piesoelemendi elastsusest C_e. Sõlmühenduse tõttu (vt. joon. 3.4) on resonantsisage-

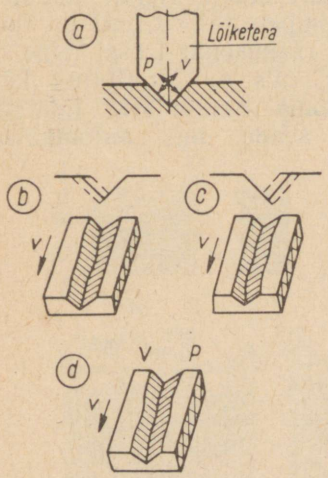


Joon. 9.7. Helipea resonantssageduste mõju sageduskarakteristikule (*a*) ja sisendtakistusele (*b*)

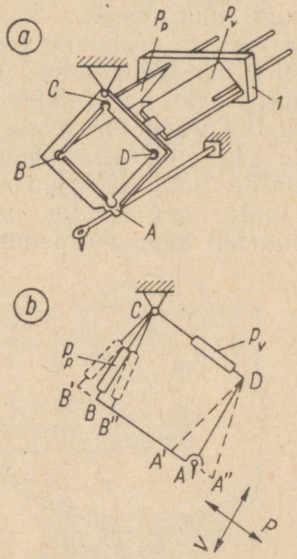
dusel siin sisendtakistus väike ja nõelateravik järgib vaevata helivao looklemist.

Kõrge resonantsisagedus f_k on määratud nõela elastsusega C_N ja nõelahoidja massiga m_H. Jadalülituse tõttu (vt. joon. 3.5.*c* ja *d*) on siin sisendtakistus suur ja plaadi riknemise vältimiseks on resonantsisagedus f_k viidud kõrgemale ülekandeala ülemisest piirist 10 kHz.

Stereoplaatidel on parem kanal salvestatud vao välisnõlvale ja vasak kanal sisenõlvale (joon. 9.8). Stereoplaadi taasestamiseks kasutatavad piesoelektrilised stereohelipead sisaldavad kaks bimorfset piesoelementi P_p ja P_v (joon. 9.9). Piesoelemendid on ühest otsast liikumatult kinnitatud helipea korpuse *1* külge, teisest



Joon. 9.8. Stereoplaadi lõikeprotsess



Joon. 9.9. Stereohelipea konstruktsioon (*a*) ja tööpõhimõte (*b*)

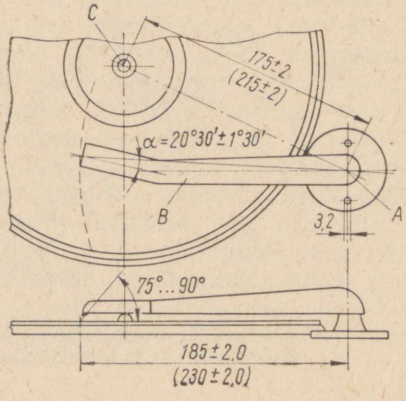
otsast aga ühendatud liikuva raamiga *ABCD*. Tänu väljalõigetele nurkades on raam deformeeritav. Looklev salvestus helivao välisnõlvas põhjustab raami deformeerimise sihis *P* (joon. 9.9.*b*) ning parema kanali piesoelemendi P_p läbipaindumise. Salvestus helivao sisenõlvas põhjustab deformatsiooni sihis *V* ja vasaku kanali piesoelemendi P_v läbipaindumise.

Kanalitevahelise ülekostvuse vältimiseks peab stereopea olema õieti monteeritud, nii et nõelateraviku võnkesihid (põhiteljestik) *V* ja *P* täpselt ühtiksid lõiketera võnkesihtidega (joon. 9.8). Juba paarikraadine erinevus põhjustaks ülekostvuse lubamatu suurenemise kanalite vahel ja stereofonilise kuuldepildi tugeva moonutumise [23, 21].

Vastavalt normidele [93, 125] peab stereohelipea enda konstruktsioonist põhjustatud ülekostvus sagedusel 1000 Hz olema alla −12 ... −20 dB, sõltuvalt helipea klassist.

Heliplaadi taasestusel võib tekkida *mittelineaarmoonutus*, kui nõela võnkumine pole plaadi raadiuse sihiline. Et helipea liigub mööda ringjoone kaart ümber oma kinnitustelje *A* (joon. 9.10), siis nõela võnketasand ei saa olla alati risti helivaole. Tänu helikäpa (toonarmi) *B* murdenurgale α on see nõue täidetud kahe helivao juures. Moonutuste vältimiseks tuleb käpp pikkusega 185 min monteerida 175 mm kaugusele ja pikem (230 mm) 215 mm kaugusele plaadi pöörlemistsentrist *C*, nagu näidatud joonisel 9.10 [93].

Kuid ka õige montaaži korral tekib taasestusel nõelale külgsihis, plaadi tsentri suunas mõjuv lisajõud. See nn. külgjõud pole kuigi suur (ca 4 ... 5% nõela koormusest plaadile), kuid tundlike ja väikese nõelakoormusega töötavate helipeade puhul suurendab mittelineaarmoonutust ja vähendab stereoefekti. Nende puuduste vältimiseks kasutatakse nn. külgjõu kompensaatorit, mis on tavaliselt kujundatud trossi otsas rippuva raskusena; trossi teine ots on üle plokiratta ühendatud tihvtiga, mis on kinnitatud käpa võllile [138]. Külgjõu eriti täpseks kompenseerimiseks lisatakse käpale veel eriline pantograafiline seade, mis automaatselt muudab käpa murdenurka α.



Joon. 9.10. Helipea õige asetus plaadiseadmel

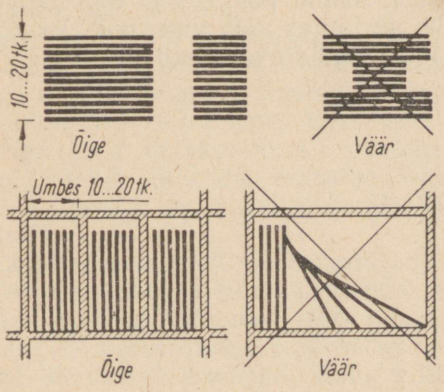
Helipea sujuvaks paigutamiseks plaadile kasutatakse nn. sujupaigutit ehk mikrolifti. See kujutab endast pneumaatilist seadet või mehaanilist kangsüsteemi, mis käivitatakse plaadiseadmel asuva kangikesega. Helipea viiakse eelnevalt plaadi kohale, kusjuures nõela teravik jääb 5...6 mm kaugusele plaadi pinnast. Sujupaiguti toimel kaldub käpp allapoole ning nõel paigutub sujuvalt helivaosse.

Plaadiseade võib olla veel varustatud nn. startnuppudega, millele vajutamisel helipea liigub automaatselt vastava läbimõõduga plaadi välise helivao kohale.

9.5. HELIPLAATIDE HOOLDAMINE

Kauamängivat heliplaati saab kuulata keskmiselt 100...200 korda ilma helikvaliteedi märgatava halvenemiseta ja 500 korda, ilma et plaat veel kasutamiskõlbmatuks osutuks. Kuid see on saavutatav vaid plaadi õigel hooldamisel ja nõuetekohasel kasutamisel [59].

Heliplaate võib hoida originaalpakendites 10...20 kaupa ülestikku (joon. 9.11). Üksteise peale võib laduda vaid samas formaadis plaate. Riiuli põhjaks võib olla klaas, mis annab kindlalt tasase aluspinna. Ruumi säästab plaatide säilitamine vertikaalasendis, kuid plaatide deformeerumise vältimiseks peavad riiuliil olema kindlasti vaheseinad iga 4...5 cm järel (joon. 9.11). Kapp olgu suletav ja eemal küttekehadest. Ka kapist väljavõetud plaadile ei tohi mõjuda päikese- ja soojuskiirgus ega tolm. Heliplaadi suurimateks vaenlasteks ongi tolm ja kriimustused. Õhust plaadile langenud tolmuterad on tunduvalt suuremad mikrolõike helivao võnkeamplituudist. Kui nõelateravik sõidab üle tolmutera, tekib taasestavas helis tugev krõps. Lisaks sellele surub nõelateravik tolmutera plaadi pehmesse materjali. Kui plaati kordki tolmusena kasutatakse, salvestatakse tolmust tingitud raginad jäädavalt plaadisse.



Joon. 9.11. Heliplaatide õige ja väär hoidmine

Tolmu vältimiseks säilitatagu heliplaati tingimata polüetüleenümbristes, mitte aga ainult tavalisest paberist ümbrikus. Viimane annab plaadi korduval sisseasetamisel ja väljavõtmisel igas jämeduses tolmukübemeid. Plaadi jätmine lahtiselt lauale või mänguseadme taldrikule on lubamatu.

Plaati võib hoida vaid servadest, nii et keskkoht (etikett) toetub põidlale või sõrmedele. Sõrmejälg helivagudel seob tolmu ja tuleb kiirelt eemaldada veeaurus niisutatud pehme riidega või pehme pintsliga. Plaadi puhastamiseks või pesemiseks pole tavaline veevärgi- ja kaevuvesi sobiv — vee aurumisel jääb plaadi pinnale üliõhuke kaltsiumi- ja teiste soolade kiht, mis rikub plaadi. Puhastada võib etüülalkoholi 25% vesilahusega (kasutada destilleeritud vett!) niisutatud lapi või pehme pintsliga [34]. Lapiks võib olla kiudusid mitteandev flanellitükk, mis on eelnevalt pestud ja destilleeritud vees loputatud. Kuiva ja väheselgi määral tolmu sisaldava lapiga pühkimine toob plaadile pigemini kahju kui kasu — tolmuosakesed hõõrutakse helivagudesse.

Väga kahjulik on staatiliste elektrilaengute tekkimine plaadi pinnale selle hõõrumisel, näiteks puhastamisel. Elektriseerunud plastmassplaadi pind tõmbab endale õhus hõljuvaid tolmukübemeid, mistõttu muutub veel tolmusemaks kui enne pühkimist. Plaadi deelektriseerimist raskendab asjaolu, et plaadimaterjal on väga suure eritakistusega ja laengud ei voola ära. Elektriseerumise vältimiseks kasutatakse erilisi, antistaatilisi silikoonühendeid [34], millega immutatakse pühkimislappi. See jätab nüüd plaadi pinnale üliõhukese õlise, kuid mittemääriva kelme, mis hoiab ära elektrostaatiliste laengute tekkimise.

Kauamängiv plaat rikneb tavalise heliplaadi nõela ja helipea kasutamisel. Stereofoonilisi heliplaate tohib taasestada vaid stereofoonilise helipeaga; kauamängiva helipea nõela teravik pole võimeline võnkuma vertikaalsihis ja otsemaid rikuks stereoplaadi!

Taasestusnõela tuleb sageli puhastada sinna kogunenud tolmust ja plaadimaterjali purust. Puhastada tuleb pehme vesivärvipintsliga, mitte aga sõrmega üle nõela tõmmates, mis võib vigastada helipea õrna võnkesüsteemi. Samal põhjusel ei tohi helipead kunagi lasta plaadile kukkuda, seejuures võib vigastuda ka nõela teravik ning edaspidi rikkuda iga kuulatava plaadi.

10.

Reverberaatorid

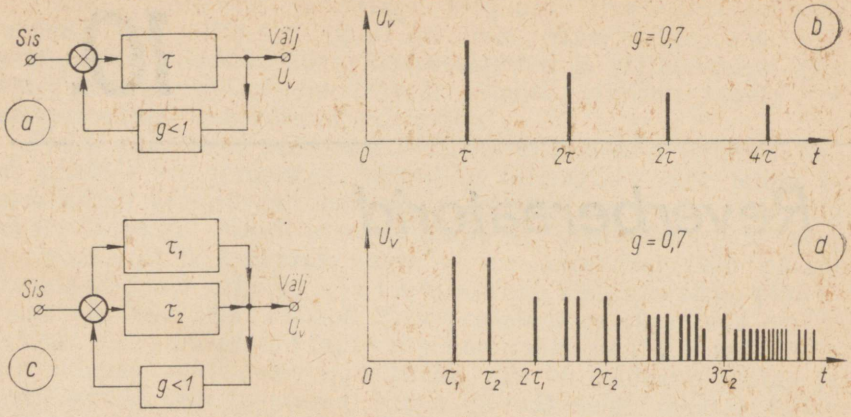
Reverberaatoriks nimetatakse seadet, milles kunstlikult pikendatakse ülekantavaid helisid, lastes neil aeglaselt sumbuda. See jätab kuulajale mulje, nagu toimuks ülekanne suure reverberatsiooniajaga ruumist. Reverberaatoriga on võimalik suurendada reverberatsiooniaega kas kogu helipildil või üksikutel esinejatel (pillirühmadel) selles.

Iga reverberaator sisaldab ühe või mitu viitlüli ja tagasisideahelat (joon. 10.1) [60]. Läbi viimase antakse osa ajaliselt nihutatud väljundsignaalist uuesti reverberaatori sisendisse, nii et tekib signaali ringlemine. Tänu sellele saadaksegi ülekantavate helide kunstlik pikenemine ning aeglane sumbumine.

Kuulajale loomutruu elamuse andmiseks peab sumbumine toimuma nagu suurtes ruumideski, s. o. eksponentsiaalselt, kusjuures ühtlaseks sumbumiseks peab signaali ringlemiste arv sekundis olema võimalikult suur.

Reverberaatoris toimuvate protsesside selgitamiseks vaatleme juhtu, kus reverberaatori sisendisse antakse üksik ja lühikese kestusega ristkülikimpulss. Impulss läbib viitlüli ja aja τ pärast jõuab reverberaatori väljundisse, kust läbi tagasisideahela ülekandeteguriga $g<1$ antakse uuesti sisendisse, läbib jälle viitlüli ning hetkel 2τ tekib väljundis järgmine impulss (joonis 10.1.*a*). Nii saadakse väljundis nn. kajaimpulsside jada, mis sumbub eksponentsiaalselt.

Eksperimentaalselt on selgitatud, et kvaliteetse tehisreverberatsiooni saamiseks peab kajaimpulsside tihedus reverberaatori väljundis olema vähemalt 1000 impulssi sekundis [60]. Selle saavutamiseks varustatakse reverberaator mitme viitlüliga, mille viiteajad üksteisest erinevad. Kahe viitlüliga reverberaatori skeem



Joon. 10.1. Ühe viitelüliga reverberaatori skeem (*a*) ja vastav kajaimpulsside ostsillogramm (*b*); kahe viitlüliga reverberaatori skeem (*c*) ja vastav kajaimpulsside ostsillogramm (*d*)

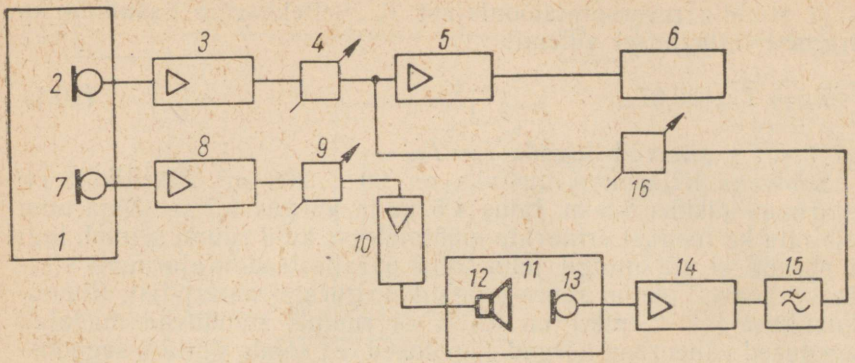
on joonisel 10.1.*c*. Andes reverberaatori sisendisse lühikese kestusega ristkülikimpulsi, saadakse väljundis kaks impulssi hetkedel τ_1 ja τ_2. Antult läbi tagasisideahela uuesti reverberaatori sisendisse põhjustab kumbki impulss kahe impulsi tekkimise väljundis. Iga ringkäiguga kahekordistub impulsside arv väljundis ja suureneb nende tihedus, nagu näitab ka ostsillogramm (joon. 10.1.*d*). Praktikas on viitlülide arv 5 ... 10 viitaegadega 30 ... 100 ms. Vajalikult suur kajaimpulsside tihedus tekib siis juba ca 0,3 s jooksul, mis tagab kvaliteetse tehisreverberatsiooni. Kajaimpulsside väikese tiheduse puhul oleks reverberaatori heli ebaloomuliku vibreeriva või detoneeriva iseloomuga.

Reverberaatorilt nõutakse peale suure kajaimpulsside tiheduse veel konstantset sageduskarakteristikut kogu kuuldesageduse piirkonnas ja müritaset alla −60 dB. Reverberatsiooniaeg olgu reguleeritav piirides 1 ... 5 s.

Käesoleval ajal on kasutusel järgmised reverberaatorid: kajaruumreverberaator, magnetlint- või magnettrummelreverberaator, plaatreverberaator ja spiraalvedrureverberaator. Katsetamisel on ultraheliviitliiniga reverberaator.

10.1. KAJARUUMREVERBERAATOR

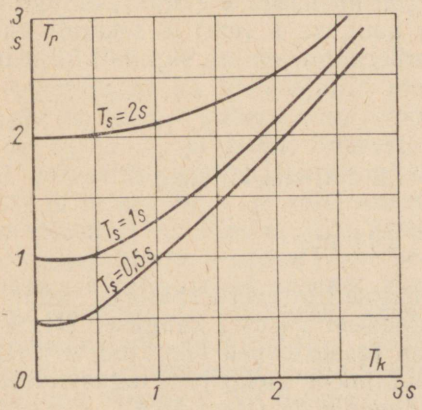
Kajaruumreverberaatoris on viitlüliks suure reverberatsiooniajaga eriline ruum, nn. kajaruum. Joonisel 10.2 on toodud klassikalise kajaruumreverberaatori skeem, millelt näeme, et ruumis *1* tekitatud helisignaal kantakse mikrofoni *2*, mikrofonivõimendi *3*, mikseri *4* ja kanalivõimendi *5* kaudu tarbijale *6*. Samast stuudiost



Joon. 10.2. Kajaruumreverberaatori skeem

mikrofoniga *7* saadud helisignaal juhitakse mikrofonivõimendi *8*, mikseri *9* ja kanalivõimendi *10* kaudu kajaruumis *11* asuvasse valjuhääldisse *12*. Kajaruumis satub heli mikrofoni *13*, mille väljund on ühendatud mikrofonivõimendi *14* kaudu korrektsioonifiltri *15* mikseriga *16*. Mikseri kaudu on võimalik kajaruumist saadud elektrilist helisignaali sobivas vahekorras segustada stuudiost otse mikrofoni *2* kaudu saabuva elektrilise helisignaaliga. On selge, et mikrofoni *2* kaudu jõuab elektriline helisignaal kiiremini võimendisse *5* kui mikrofoni *7* kaudu läbi kajaruumi. Kanali reverberatsiooniaeg sõltub kajaruumi reverberatsiooniajast ja mikseri *16* summumusest [73].

Joonisel 10.3 toodud kõverate abil on võimalik leida resulteeriv reverberatsiooniaeg T_r, lähtudes kajaruumi reverberatsiooniajast



Joon. 10.3. Resulteeriva reverberatsiooniaja leidmine

T_k ja stuudio reverberatsiooniajast T_s. Selleks võib kasutada ka järgmist ligikaudset valemit:

$$T_r = T_k + 0{,}6T_s; \qquad (10.1)$$

kui $T_s < 1$ s, siis võib lugeda $T_r \approx T_k$.

Sobivaks kajaruumi mahuks on 90...200 m³. Harilikult on kajaruumi pikkus 5,8 m, laius 4,6 m ja kõrgus 3,7 m. Kajaruum võib olla ka toodust erinevate mõõtmetega, kuid ruumi seinad, lagi ja põrand ei või mingil juhul olla paralleelsed. Kajaruumi sisepinnad peavad olema suure peegeldusteguriga materjalist. Ruumiakustikast (vt. 2. ptk.) on teada, et ruumis sumbuvad madalad sagedused vähem kui kõrged sagedused. Et saada ühtlast sageduskarakteristikut, lülitatakse kajaruumist ülekantava signaali ahelasse madalaid sagedusi nõrgendav filter. Peale selle võib kajaruumi olla paigutatud akustilised konstruktsioonid (plaadid) või elektronsummutid, mis summutavad madalaid sagedusi.

10.2. MAGNETLINTREVERBERAATOR

Joonisel 10.4 on toodud magnetlintreverberaatori skeem. Tarbijasse *6* juhitakse elektriline helisignaal: 1) otse helikanali kaudu (elemendid *1*, *2*, *3*, *4* ja *5*), 2) läbi magnetlintreverberaatori, mis koosneb mikserist *7*, võimendist *8*, salvestusvõimendist *9*, salvestuspeast *10*, taasestuspeade komplektist *11*...*15*, kustutuspeast *16* ja kustutusgeneraatorist *17* ning ringlevast magnetlindist *19*. Taasestuspeade komplektist juhitakse erinevate viiteaegadega signaalid mikserite komplekti *20*...*24* sealt võimenditesse *25*, *26*, mikseritesse *27*, *29*, võimenditesse *28*, *30*, filtrisse *31* ja võimendisse *32*. Võimendi *32* väljund on ühendatud sidestuslüli *5* abil helikanaliga.

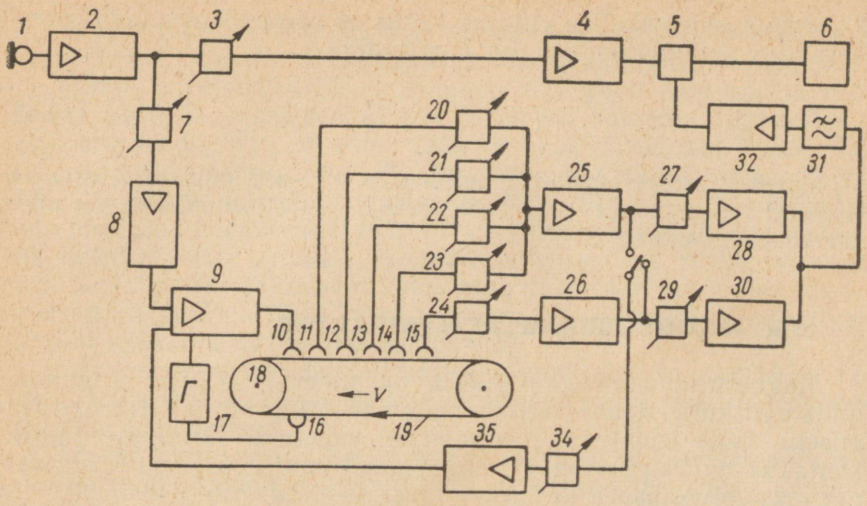
Magnetlintreverberaatoris salvestatakse (salvestuspea abil) helikanalist tulev elektriline helisignaal ringlevale magnetlindile. Lindile salvestatud signaal liigub kiirusega v (cm/s), läbides salvestus-taasestuspeade vahelise kauguse l (cm) τ sekundi vältel. Seega ühe taasestuspeaga reverberaator tekitab signaali hilinemise

$$\tau = \frac{l}{v}, \qquad (10.2)$$

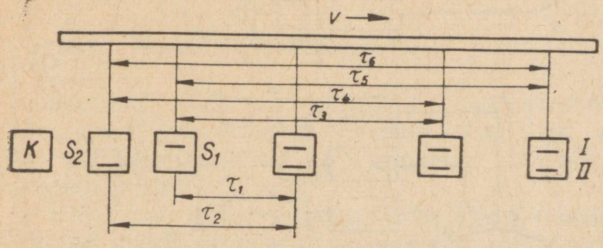
Kui näiteks $v = 38{,}1$ cm/s ja $l = 1{,}2$ cm, siis viiteaeg

$$\tau = \frac{1{,}2}{38{,}1} = 0{,}0344 \text{ s} \quad \text{ehk} \quad 3{,}44 \text{ ms}.$$

Tegelikult kasutatakse magnetlintreverberaatoris kuni 10 taasestuspead, mis asuvad üksteisest võrdsel kaugusel (l). Valemiga 10.2 on võimalik leida iga taasestuspea tekitatud viiteaeg τ. Magnetlintreverberaatoris kasutatakse elektrilist tagasisidestust, mille ahelas on mikser *34* ja võimendi *35* (joon. 10.4).



Joon. 10.4. Magnetlintreverberaatori skeem



Joon. 10.5. Kahe salvestusrajaga magnetlintreverberaatori skeem

Kasutatakse ka kaherajalist magnetlintreverberaatorit. Joonisel 10.5 on toodud kaherajalise magnetlintreverberaatori salvestuspeade S_1 ja S_2 ja kolme taasestuspea asetuse põhimõtteskeem. Seal salvestuspeaga S_1 salvestatakse signaal lindi I salvestusrajale ja peaga S_2 — II salvestusrajale. Kaherajalise magnetlintreverberaatori viiteajad $\tau_1 \ldots \tau_n$ arvutatakse valemiga 10.2.

Magnetlintreverberaatori reverberatsiooniaja T arvutamisel oletatakse, et salvestatud signaal koosneb ristkülikimpulssidest. Et saada reverberaatori väljundis eksponentsiaalselt sumbuv (60 dB) impulsside jada, paigutatakse igasse taasestuspea ahelasse vajalik sumbumus (mikser). Selle tulemusel on iga järgmise impulsi amplituud eelmisest ΔP detsibelli võrra väiksem. Kui on teada ka

kajaimpulsside vaheline viiteaeg τ, siis on võimalik arvutada reverberaatori reverberatsiooniaeg T valemiga

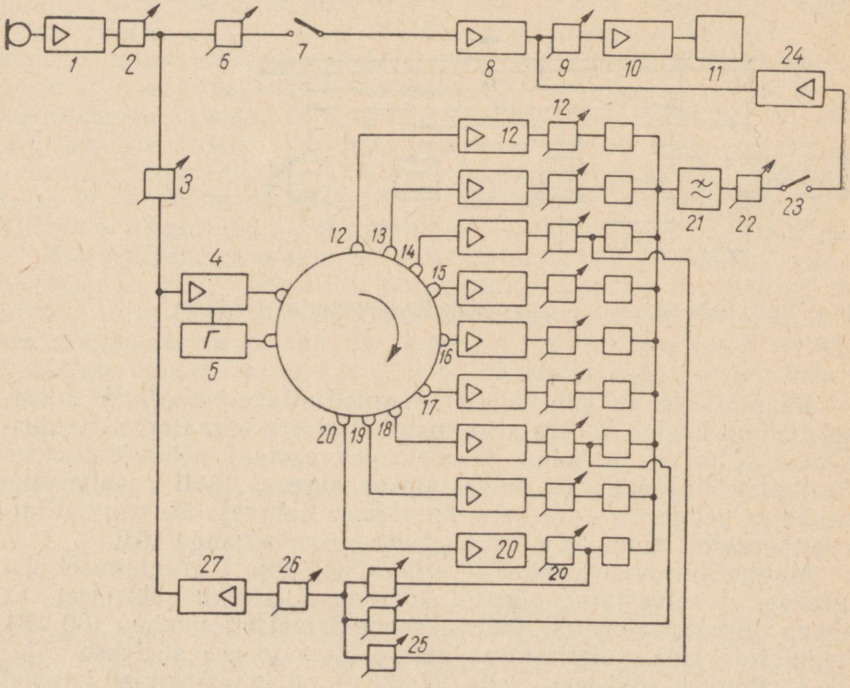
$$T = \frac{60}{\Delta P}\tau. \tag{10.3}$$

Magnetlintreverberaatori puuduseks on suur müratase, mis on tingitud taasestuspeade suurest arvust. Tema paremuseks on pikk reverberatsiooniaeg T.

10.3. MAGNETTRUMMELREVERBERAATOR

Magnettrummelreverberaatoris on pidevalt pöörlev trummel, mille välisküljel asub magnetiliste omadustega süvis heli salvestamiseks. Selle trumli magnetmaterjali vahetusse lähedusse (mitte kontakti) on paigutatud 11 magnetpead, millest üks on kustutuspea, üks salvestuspea ja üheksa taasestuspead (joon. 10.6) [9].

Mikrofonist juhitakse elektriline helisignaal võimendi *1*, mikserite *2* ja *6*, lüliti *7*, võimendi *8*, mikseri *9* ja võimendi *10* kaudu tarbijasse *11*.



Joon. 10.6. Magnettrummelreverberaatori skeem

Reverberaatorit läbiv signaal on ühendatud mikseri *3* ja salvestusvõimendi *4* kaudu salvestuspeaga, kus ta salvestatakse trumlile.

Trumli pöörlemisel jõuab salvestuspea poolt salvestatud heli kõige varem taasestuspea *12* ette ja järjest suurema hilinemisega taasestuspeade *13*...*20* ette. Trumlilt saadud signaal võimendatakse eelvõimendites *12*...*20*. Seejärel on võimalik mikseritega *12*...*20* nende helitaset reguleerida. Mikserite 12...20 väljundid on ühendatud paralleelselt filtri *21* sisendiga. Filtriga *21* on võimalik reverberaatori signaali sageduskarakteristikut soovi kohaselt muuta. Filtri *21* väljund on ühendatud mikseri *22* sisendiga. Selle mikseri väljund on lüliti *23* abil ühendatud võimendi *24* sisendiga ja läbi mikseri *9* väljundvõimendiga *10*.

Osa taasestusvõimendi väljundsignaalist juhitakse mikserite *25*, *26* ja võimendi *27* kaudu salvestusvõimendisse *4* ja salvestatakse trumlile teistkordselt.

Trumli pöörlemiskiiruse ja peade omavahelise kauguse reguleerimisega on võimalik reverberaatori reverberatsiooniaega muuta. Taasestuspead asuvad väga lähedal trumli magnetmaterjalile (õhuvahe 0,01 mm). Trummel peab pöörlema väga täpselt, et vältida reverberaatori signaali amplituudi kõikumist (amplituudi suurenemine ja vähenemine toimuks vastavalt trumli ja taasestuspea vahelise kauguse muutusele).

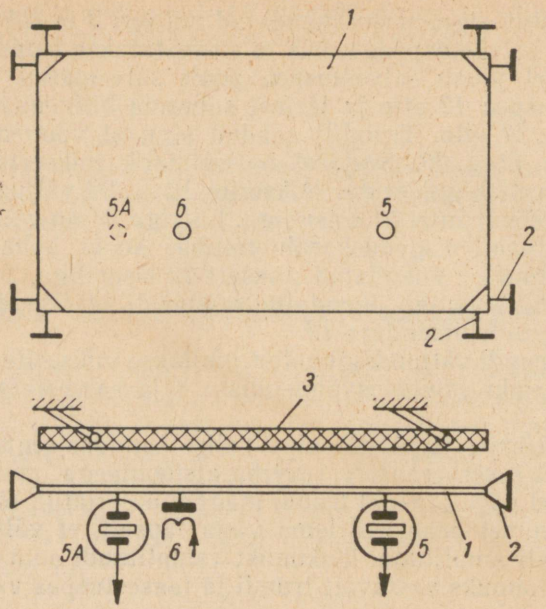
10.4. PLAATREVERBERAATOR

Joonisel 10.7 on näidatud plaatreverberaatori mehaanilise konstruktsiooni põhimõte. Terasplekist leht *1*, mille paksus on 0,4...0,5 mm ja suurus 1×2 meetrit, on vedrude *2* abil kinnitatud amortiseeritud raamile.

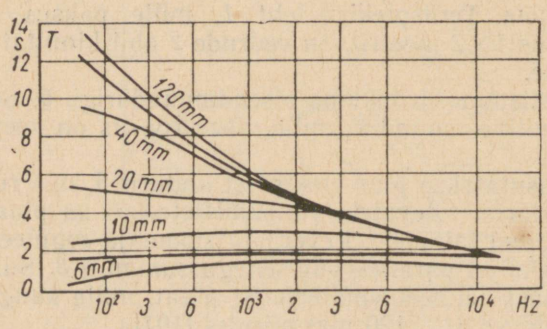
Plaat pannakse ristisuunas võnkuma sisendmuunduriga *6*. Selleks on elektrodünaamiline muundur, mille vibreeriv ots on keevitatud lehe külge.

Vibroadapteriks kasutatakse piesoelektrilist andurit *5*, mis reageerib nii otse vibraatorist tulevatele võnkumistele kui ka plaadi äärtest tagasipeegeldunud lainetele. Reverberatsiooniaja reguleerimiseks on plaadi tagaküljel paralleelselt sellega summuti *3*. Summutiks on mikropoorsest helineeldematerjalist plaat, mille kaugus terasplaadist on muudetav 3...120 mm piirides [101].

Reverberaatori sageduskarakteristik sõltub vibreeriva plaadi ja summutuspaneeli vahelisest kaugusest (joon. 10.8). Summutuspaneel valmistatakse pressitud klaaskiududest. Paneeli pind tehakse eritöötlusega võimalikult siledaks, nii et paneeli võib plaadile lähendada kuni 3 mm kaugusele, mispuhul reverberatsiooniaeg on 0,8 s. Jooniselt 10.8 näemegi, et mida lähemal paikneb paneel plaadile, seda ühtlasem on reverberaatori sageduskarakteristik. Suurem kaugus põhjustab reverberatsiooniaja suurenemise madalatel helisagedustel.

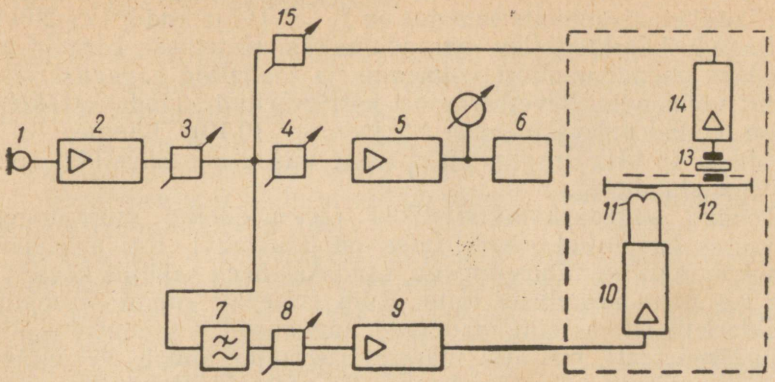


Joon. 10.7. Plaatreverberaatori skeem

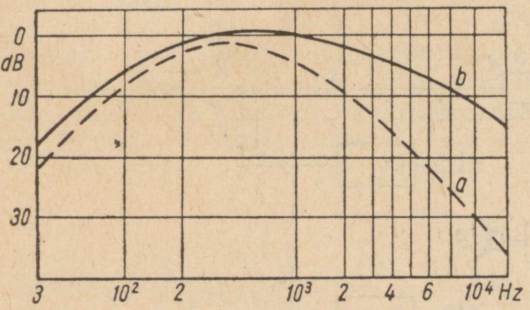


Joon. 10.8. Plaatreverberaatori reverberatsiooniaja *T* sõltuvus sagedusest ja summuti kaugusest

Plaatreverberaatori teatud puuduseks on see, et otselaine jõuab vibraatorist vibroadapterini juba umbes 6 ms jooksul, mis vastab helilaine 2 m pikkusele teele õhus. Seepärast saab plaatreverberaatoriga edukalt imiteerida vaid väiksemate stuudiote akustikat. Et jätta suure saali muljet, peab esimeste kajapeegelduste intervall



Joon. 10.9. Plaatreverberaatori ja helikanali skeem



Joon. 10.10. Plaatreverberaatori väljundpingete korrigeerimata (*a*) ja korrigeeritud (*b*) sageduskarakteristik

olema vähemalt 10 ms. Seda on võimalik saada näiteks magnetreverberaatoriga, mistõttu suure saali imiteerimiseks kasutatakse viimast koos plaatreverberaatoriga.

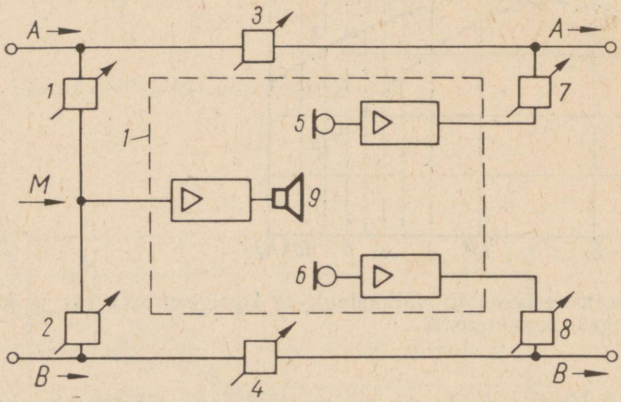
Joonisel 10.9 on toodud plaatreverberaatoriga helikanali skeem, millest nähtub, et mikrofoni *1* väljundsignaal juhitakse võimendi *2*, mikseri *3*, *4* ja võimendi *5* kaudu tarbijasse *6*. Sama võimendi *2* väljundsignaal juhitakse filtri *7*, mikseri *8*, võimendi *9* ja reverberaatori võimendi *10* kaudu sisendmuundurile *11*.

Vibreerivalt plaadilt *12* saadakse vibroanduri *13* abil reverbeeriv elektriline helisignaal, mida võimendatakse võimendis *14* ja juhitakse mikseri *15* kaudu helikanalisse, mis on ühendatud tarbijaga *6*.

Plaatreverberaatori väljundpinge sageduskarakteristik langeb nii madalatel kui ka kõrgetel helisagedustel (joonisel 10.10 kriipsjoon) [113].

Plaadi omaresonantsisagedus on 3 . . . 5 Hz ja anduril ca 20 kHz. Sageduskarakteristiku parendamiseks tõstetakse kõrgeid helisagedusi sisendmuunduri võimendis ja madalaid sagedusi vibroanduri võimendis. Reverberaatori korrigeeritud sageduskarakteristik on toodud pideva joonena *b* (joonisel 10.10). Langus 13 dB sagedusel 10 kHz on siin nüüd sama mis heade akustiliste omadustega stuudioski.

Toodud sageduskarakteristikud on mõõdetud mürapingega, kusjuures kasutatud ribade laius on 3 oktaavi. Kui aga mõõta monokromaatilise siinuspingega, saadakse üsna sakiline kõver paljude resonantsisageduste tõttu. Kuid erinevalt ruumi resonantsikarakteristikust on siin madalatel sagedustel resonantsisagedusi palju tihedamalt, mistõttu plaatreverberaator annab ülekantavale helile omapärase kõla. Toodetakse ka väikseid plaatreverberaatoreid, mille välismõõtmed on 63×67×30 cm ja mass 60 kg. Sellise reverberaatori reverbereeriva plaadi paksus 0,02 mm. Plaadile kinnitatud vibroanduri ja sisendmuunduri mass on vaid mõni milligramm.



Joon. 10.11. Stereofoonilise plaatreverberaatori lihtsustatud struktuuriskeem

Joonisel 10.11 on toodud stereofoonilise plaatreverberaatori skeem. Stereofoonilise efekti saamiseks kasutatakse kahte vibroandurit *5* ja *6* (vt. joon. 10.7) ja ühte sisendmuundurit *9*. Vibroandurid *5* ja *6* ühendatakse mikserite *7* ja *8* abil vastavate stereofooniliste kanalitega *A* ja *B*.

Plaatreverberaatoril on kaugjuhtimisseade, millega saab summutit plaadile lähemale või sellest kaugemale nihutada. Plaatreverberaatori puuduseks on tema tundlikkus välismüradele, mis põhjustavad plaadi võõrvibreerimise. Seepärast tuleb seade asetada omaette ruumi, milles müratase ei ületa 50 dB.

10.5. VEDRUREVERBERAATOR

Uuritud on silindriliste spiraalvedrude kolme liiki võnkumisi:

1) spiraalvedru mõjutatakse elektrilise helisignaali pingega selliselt, et vedru võnguks risti oma teljega (joon. 10.12.*a*);

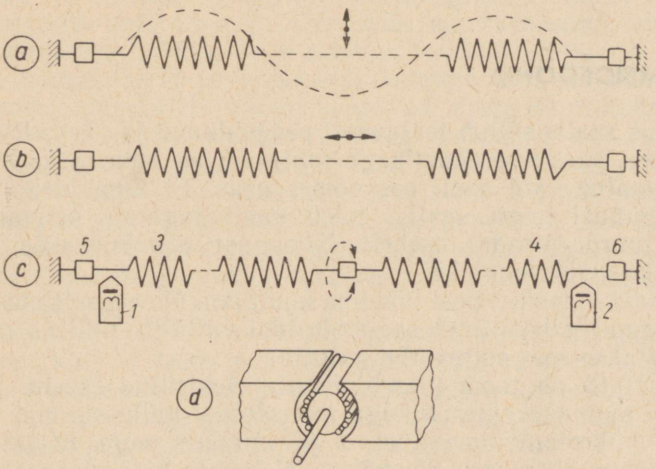
2) elektrilise sisendpinge mõjul tõmbub vedru kokku ja lahti, s. t. võnkumine toimub piki vedru (joon. 10.12.*b*);

3) elektrilise sisendpinge mõjul toimub vedrus torsioon- ehk väändevõnkumine [35 ja 104].

Esimene vedrureverberaator ei talu põrutusi, teisel tekitavad sisendpinge hetkelised ülepinged suuri moonutusi. Kasutamist on leidnud kolmas tüüp, s. o. väändevõnkumistega vedrureverberaator, mis pole nii tundlik põrutustele ega ülekoormusele.

Joonisel 10.12.*c* on toodud sellise vedrureverberaatori skeem. Vedru külge on kinnitatud elektromagnetiline sisendmuundur *1*. Samasuguse konstruktsiooniga on ka väljundmuundur *2*. Vedrud *3* ja *4* on teineteise suhtes vastupidiselt keeratud. Sellega vähendatakse vedrude mehaanilist segavat mõju teineteisele ja välditakse nende väsimust. Vedrude summutid on *5* ja *6*.

Sisenev helisignaal juhitakse reverberaatori sisendmuunduri mähisesse *1* (joon. 10.12.*d*). Muunduri pooluste vahel asub pööratav magnet, nn. rootor, mille pöördenurk muutub vastavalt siseneva helisageduse voolu tugevuse muutustele. Tekkiv vääne kandub piki vedru väljundmuundurite rootoritele, mille pöördumine tekitab väl-



Joon. 10.12. Vedrureverberaatori põhimõtteskeem:
a — vedru võngub risti oma teljega, *b* — vedru võngub telje sihis, *c* — vedru väändevõnkumine, *d* — elektromagnetiline muundur

jundmähisel pinge U_2. Signaali levimiskiirus v oleneb heli levimiskiirusest piki vedru telge ja arvutatakse valemiga

$$v = \frac{1}{\sqrt{IC}} = \frac{r}{4\pi R^2} \cdot \sqrt{\frac{E_y}{\varrho}} \text{ keerdu sekundis,} \qquad (10.4)$$

kus I — vedru keeru inertsimoment, C — vedru ühe keeru elastsus, R — vedru raadius cm, r — vedrutraadi raadius cm, ϱ — materjali tihedus g/cm^3, E_y — Youngi elastsusmoodul. Seega reverberaatori vedru keerdude arv n etteantud viiteaja puhul

$$n = v\tau = \frac{r}{4\pi R^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\varrho}} \cdot \qquad (10.5)$$

Kui näiteks valmistada vedru terastraadist, mille raadius $r = 0{,}6$ mm, ja kui $R = 30$ mm ning vajalik viiteaeg $\tau = 40$ ms, siis sellisel vedrul peab olema 550 ... 600 keerdu [113].

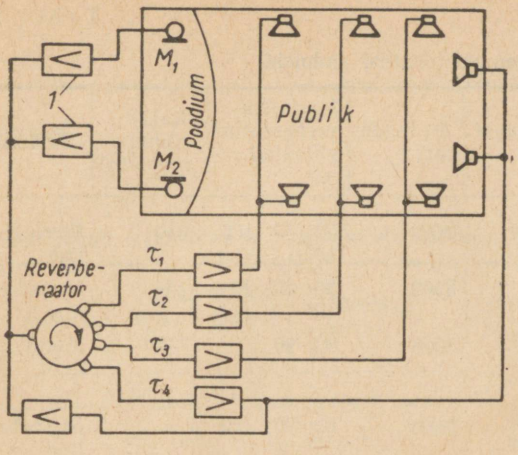
Signaali sumbumus pärast paljukordset peegeldust vedru otstest oleneb sagedusest. Sellise reverberaatori reverbeeriva signaali sageduskarakteristik langeb nii madalatel kui ka kõrgetel helisagedustel. Sageduskarakteristiku parandamiseks kasutatakse vedru elastsuse ja muunduri ankrute massi resonantsisagedusi. Häid tulemusi saavutatakse siis, kui resonantsisagedused asetada madalatel sagedustel piirkonda 100 ... 200 Hz ja kõrgetel sagedustel piirkonda 4000 ... 5000 Hz.

10.6. AMBIOFOONIA

Kuuldavus saalis sõltub teatavasti peegeldunud ja otseheli suhtest. Tavalises, passiivse akustikaga saalis on see suhe ja ka kuuldavus optimaalne vaid saali eespoolses osas. Et luua ideaalseid kuulamistingimusi kogu saalis, tuleb saali tagaosa heliväljale kunstlikult juurde lisada otseheli. Niisugust võimendussüsteemi nimetataksegi ambiofooniaks.

Juurdelisatav otseheli peab jõudma kuulajani üheaegselt poodiumilt saabuvaga. Selleks tuleb see anda läbi viitlüliti, milleks tavaliselt kasutatakse magnetreverberaatorit.

Joonisel 10.13 on toodud ambiofoonia elektriline skeem. Siin M_1 ja M_2 on suundkarakteristikuga mikrofonid, mille signaal võimendatakse mikrofonivõimendites 1 ja antakse nelja taasestuspeaga magnetreverberaatori sisendisse. Neljanda taasestuspea väljundist antakse tagasisidesignaal reverberaatori sisendisse. Viiteaegadega $\tau_1, \ldots \tau_4$ väljundsignaalid võimendatakse ja antakse saali valjuhääldite gruppidesse, mis on jaotatud ühesuguste intervallidega piki saali. Et luua saalis optimaalset kuuldavust, tuleb



Joon. 10.13. Ambiofooniaseadme skeem

viiteajad valida vastavalt valjuhäälditе gruppide kaugusele poodiumist nii, et helisignaal läbi reverberaatori jõuaks kuulajani samaaegselt otseheliga. Kui näiteks saali pikkus on 50 m, peab viimase grupi viide olema ca 150 ms.

Tegelik kommutatsiooniskeem on keerulisem kui joonisel 10.13 toodu ja võimaldab vajaduse korral kõikidesse valjuhäälditesse lisada veel kõikide gruppide summasignaali. Lisaks magnetreverberaatorile võib süsteem sisaldada ka kajaruumi, mille signaal segustatakse helikanalisse sobivas suuruses ja kohas. Ettekannete ajal kommuteerib ja reguleerib ambiofooniat helitehnik või toonmeister juhtpuldist (varem koostatud programmi kohaselt).

Ambiofoonilise seadme võimsus valitakse vastavalt soovitud helirõhule, saali suurusele ja reverberatsiooniajale (vt. valem 6.1). Seejuures tuleb arvestada, et esinev ansambel või orkester põhjustab saalis niigi teatud helirõhu, mistõttu seadme elektriline võimsus võib olla selle võrra väiksem [101]. Ambiofoonilise efekti saamiseks tuleb kasutada kõrgekvaliteedilisi mikrofone, võimendeid ja valjuhääldeid.

Joonisel 10.13 on toodud monofoonilise ambiofooniaseadme skeem, kuid süsteem võib olla kujundatud ka stereofoonilisena, mis annab kuulajale täiuslikuma, ruumilisema helipildi. Nimelt toidab siis mikrofonidegrupp M_1 oma reverberaatori kaudu saali parempoolseid valjuhääldeid ja M_2 — vasakpoolseid.

Stereoambiofooniat saab edukalt kasutada loomutruuks heliülekandeks ühest saalist teise [101].

Andmed mõnede maailma suurimate koosoleku- ja teatrisaalide ja seal kasutatavate ambiofooniliste süsteemide kohta on tabelis 10.1 [2].

Tabel 10.1

Mõnede ambiofooniliste süsteemide tehnilisi andmeid

Asukoht	Nimetus	Ruumala m^3	Kohtade arv	Magnetreverberaatori viiteajad ms	Kajaruumi maht m^3	Süsteem
Moskva, Kreml	Kongresside Palee	60.10^3	2600	50; 75; 100; 150	330	Stereofooniline
Frankfurt	Festhalle Hoechst	88.10^3	3500	30; 60; 70; 100	165	Monofooniline
Boston	War Memorial Auditorium	40.10^3	5000	60; 90	—	Monofooniline
New York	Radio City Music Hall	60.10^3	2600	60; 90; 150	—	Stereofooniline

Kodumaine elektroonikatööstus valmistab ambiofoonilisi stereosüsteeme KЗТУ-1 4000...6000 inimest ja KЗТУ-3 2000...4000 inimest mahutavatele saalidele [101]. Süsteemidel on väljundid ringhäälingu ja televisiooni jaoks ning nad on vastavalt ümberkommuteerivad, kui samas saalis demonstreeritakse ka kinofilme. Näiteks süsteem KЗТУ-3 sisaldab kaks magnetreverberaatorit ja kajaruumi ning 15 võimenduskanalit. Igas kanalis on 2 võimendit à 100 W.

Võimenduskanalid on jaotatud järgmiselt: 1) 4 kanalit stereofoonilise ambiofoonia jaoks; 2) 5 kanalit stereofooniliselt lavaportaalis või poodiumi kohal ülal ning ekraani taga olevate valjuhääldite jaoks; 3) 4 kanalit kõne või heliefektide võimendamiseks. Valjuhääldid paigutatakse saali seintesse ja lakke; 4) üks kanal lisavõimenduseks saali mõne tsooni jaoks; 5) üks kanal induktsioonsüsteemiliste kuuldeaparaatide toiteks (saalis ja selle naaberruumides). Süsteemi 22 mikrofoni paiknevad laval ja orkestriruumis ning on jaotatud viide stereofoonilisse gruppi. Süsteemi juhitakse helipuldist; reguleeritav on sageduskarakteristik piirsagedustel ± 12 dB ulatuses ja iga kanali helitase; kaheksat stereofoonilist kanalit kontrollitakse ostsilloskoopindikaatoritega.

Lisad

Lisa 1

SI mõõtühikud elektriliste ja magnetiliste suuruste mõõtmiseks

Suuruse nimetus	Valem mõõtühiku tuletamiseks	Mõõtühiku nimetus	Mõõtühiku tähis	Mõõtühiku dimensioon
1	2	3	4	5
Vool	—	amper	A	$A = m^{1/2} kg^{1/2} s^{-1}$
Elektrihulk	$q = It$	kulon	C	$s \cdot A$
Elektriline moment	$p = ql$	kulon-meeter	$C \cdot m$	$m \cdot s \cdot A$
Laengu pinditihedus	$\delta = \frac{q}{S}$	kulon ruutmeetri kohta	$\frac{C}{m^2}$	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
Töö	$A = Fs$	džaul	J (N · m)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
Potentsiaal, pinge, elektromootorjõud	$U = \frac{A}{q}$	volt	V	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Elektrimahtuvus	$C = \frac{q}{U}$	farad	F	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Elektritakistus	$R = \frac{U}{I}$	oom	Ω	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Elektrieritakistus	$\varrho = \frac{RS}{l}$	oom-meeter	$\Omega \cdot m$	$m^3 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
Elektrijuhtivus	$G = \frac{1}{R}$	siimens	S	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Elektrierijuhtivus	$\gamma = \frac{1}{\varrho}$	siimens meetri kohta	$\frac{S}{m}$	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Elektrivälja tugevus	$E_v = \frac{U}{d}$	volt meetri kohta	$\frac{V}{m}$	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
Induktsioonivoog	$N^* = q$	kulon	C	$s \cdot A$
Elektriline nihe	$D^* = \frac{N^*}{S}$	kulon ruutmeetri kohta	$\frac{C}{m^2}$	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
Elektriline läbitavus	$\varepsilon_e{}^* = \frac{D^*}{E_v}$	farad meetri kohta	$\frac{F}{m}$	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
Magnetvoog	$\Phi = BS$	veeber (= 10^8 Mx)	Wb	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Magnetvoo tihedus	$B = \frac{\Phi}{S}$	tesla (= 10^4 Gs)	T	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$

1	2	3	4	5
Magnetvälja tugevus	$H=\frac{I}{2\pi r}$	amper meetri kohta	$\frac{A}{m}$	$m^{-1}\cdot A$
Magnetiline moment	$P_m=IS$	amper korda meeter ruudus	$A\cdot m^2$	$m^2\cdot A$
Pooluse tugevus	$m=\frac{A}{I}$	veeber	Wb	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-1}$
Magnetomotoorjõud	$\Theta_M=wI$	amper või amperkeerd	A	A
Induktiivsus	$L=\frac{\Phi}{I}$	henri	H	$m^2\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^{-2}$
Magnetiline läbitavus	$\mu=\frac{B}{H}$	henri meetri kohta	$\frac{H}{m}$	$m\cdot kg\cdot s^{-2}\cdot A^2$
Aktiivvõimsus	$P=UI\cos\varphi$	vatt	W	$m^2\cdot kg\cdot s^{-3}$
Näivvõimsus	$P_s=UI$	voltamper	VA	$m^2\cdot kg\cdot s^{-3}$
Reaktiivvõimsus	$P=UI\sin\varphi$	varr	var	$m^2\cdot kg\cdot s^{-3}$

Vaakumi magnetiline läbitavus $\mu_0^*=4\pi\cdot 10^{-7}$ H/m.

Vaakumi elektriline läbitavus $\varepsilon_0^*=\frac{1}{4\pi c^2}10^7$ F/m,

kus $c\approx 3\cdot 10^8$ m/s — valguse kiirus vaakumis.

* Mõõtühiku nn. ratsionaliseeritud kuju [62].

Lisa 2

SI mõõtühikud akustiliste suuruste mõõtmiseks

Suuruse nimetus	Valem mõõtühiku tuletamiseks	Mõõtühiku nimetus	Mõõtühiku tähis	Mõõtühiku dimensioon
Helienergia tihedus	$E=\frac{A}{V}$	džaul kuupmeetri kohta	$\frac{J}{m^3}$	$m^{-1}\cdot kg\cdot s^{-2}$
Heliintensiivsus	$I=\frac{A}{St}$	vatt ruutmeetri kohta	$\frac{W}{m^2}$	$kg\cdot s^{-3}$
Helirõhk	$p_0=\varrho\omega cx_0$	paskal (=10 akustilist baari)	$Pa=\frac{N}{m^2}$	$m^{-1}\cdot kg\cdot s^{-2}$
Viskoosne hõõrdetakistus	$r=\frac{F}{v}$	njuutonsekund meetri kohta	$\frac{N\cdot s}{m}$	$kg\cdot s^{-1}$
Ruumkiirus, vookiirus	$v_r=\overline{v}S$	kuupmeeter sekundis	$\frac{m^3}{s}$	$m^3\cdot s^{-1}$
Akustiline takistus	$r_a=\varrho c=\frac{p}{v}$	akustiline oom	$\frac{N\cdot s}{m^2}$	$m^{-1}\cdot kg\cdot s^{-1}$
Akustiline ruumtakistus e. vootakistus	$r_a=\frac{p}{v_r}$	njuutonsekund meetri viienda astme kohta	$\frac{N\cdot s}{m^5}$	$m^{-4}\cdot kg\cdot s^{-1}$

Helineeldumistegurid

Nimetus	Kihi paksus mm	Õhuvahe mm	Helineeldumistegur sagedusel Hz						
			125	250	500	1000	2000	4000	6000
Inimesed	—	—	0,16	0,25	0,40	0,44	0,48	0,48	0,48
Vaip	40	—	0,12	0,13	0,17	0,33	0,48	0,47	0,46
Laudpõrand	—	—	0,06	0,07	0,06	0,05	0,05	0,07	0,08
Krohvitud pind	25	—	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04
Arboriit	—	—	0,31	0,33	0,47	0,53	0,59	0,64	0,68
MTMI-50II	—	—	0,80	0,82	0,73	0,68	0,47	0,45	0,45
Parkett asfaldil	—	—	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,22	—
Plaat	—	0	0,02	0,14	0,65	0,90	0,87	0,86	0,92
«Traverton»	—	50	0,16	0,65	0,90	0,86	0,76	0,67	0,68
	—	100	0,28	0,81	0,86	0,87	0,89	0,86	0,88
Plaat II A/D	—	0	0,05	0,59	0,52	0,53	0,25	0,11	0,08
	—	50	0,18	0,60	0,52	0,55	0,25	0,13	0,10
	—	100	0,34	0,62	0,52	0,52	0,26	0,15	0,14
Perforeeritud plaat	—	0	0,01	0,17	0,68	0,98	0,86	0,45	0,28
Plaat II A/O	—	50	0,05	0,42	0,98	0,90	0,80	0,45	0,31
	—	100	0,2	0,52	0,98	0,85	0,80	0,45	0,28
Perforeeritud resonantsplaat (augu läbimõõt Ø 5 mm, aukude vahe 100 mm, sees mineraalvatt)	50	50	0,40	0,70	0,30	0,10	0,05	0,05	0,05
	100	100	0,80	0,52	0,27	0,14	0,12	0,10	0,10

Mitmesuguste piirete keskmine heliisolatsioonivõime

Piirde tüüp	Mõõtmed	1 m^2 mass kg	Keskmine heliisolatsioonivõime dB
Tellisvahesein	Tellisseina paksus 120 mm, krohvi paksus 2×10 mm, seina kogupaksus 140 mm	240	47
Krohvitud tellissein	Tellisseina paksus 250 mm, krohvi paksus 2×10 mm, seina kogupaksus 270 mm	460	53
Krohvitud tellissein	Tellisseina paksus 380 mm, krohvi paksus 2×10 mm, seina kogupaksus 400 mm	680	56
Krohvitud tellissein	Tellisseina paksus 510 mm, krohvi paksus 2×10 mm, seina kogupaksus 530 mm	1120	61
Krohvitud tellissein	Tellisseina paksus 900 mm, krohvi paksus 2×10 mm, seina kogupaksus 920 mm	1560	64,5
Vineervahesein	50 mm paksune pruss kahelt poolt kaetud 5 mm paksuse vineeriga, seina kogupaksus 60 mm	20	30
Mõlemalt poolt krohvitud puitkilpsein	Kilbi paksus 50 mm, krohvi paksus 2×20 mm, seina kogupaksus 90 mm	85	40
Prussidel asuv krohvitud laudsein	Prussid 60×60 mm, kattelaud 2× (20...25) mm, krohvi paksus 2× (20...25) mm, seina kogupaksus 150 mm	80	40
Kahekordne krohvitud laudsein	Laud 50 mm, laud 25 mm, kartong 5 mm, krohvi paksus 2× (20...25) mm, Seina kogupaksus 120 mm	95	41

Detsibellides (nulltaseme $2{,}03 \cdot 10^{-5}$ Pa suhtes) väljendatud helirõhule vastav rõhk Pa

dB	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000 020 3	0,000 022 8	0,000 025 6	0,000 028 7	0,000 032 2	0,000 036 1	0,000 040 6	0,000 045 5	0,000 051 1	0,000 057 3
10	0,000 064 3	0,000 072 1	0,000 080 9	0,000 090 8	0,000 102	0,000 114	0,000 128	0,000 144	0,000 161	0,000 181
20	0,000 203	0,000 228	0,000 256	0,000 287	0,000 322	0,000 361	0,000 406	0,000 455	0,000 511	0,000 573
30	0,000 643	0,000 721	0,000 809	0,000 908	0,001 02	0,001 14	0,001 28	0,001 44	0,001 61	0,001 81
40	0,002 03	0,002 28	0,002 56	0,002 87	0,003 22	0,003 61	0,004 06	0,004 55	0,005 11	0,005 73
50	0,006 43	0,007 2	0,008,09	0,009 08	0,010 2	0,011 4	0,012 8	0,014 4	0,016 1	0,018 1
60	0,020 3	0,022 8	0,025 6	0,028 7	0,032 2	0,036 1	0,040 6	0,045 5	0,051 1	0,057 3
70	0,064 3	0,072 1	0,080 9	0,090 8	0,102	0,114	0,128	0,144	0,161	0,181
80	0,203	0,228	0,256	0,287	0,322	0,361	0,406	0,455	0,511	0,573
90	0,643	0,721	0,809	0,908	1,02	1,14	1,28	1,44	1,61	1,81
100	2,03	2,28	2,56	2,87	3,22	3,61	4,06	4,55	5,11	5,73
110	6,43	7,21	8,09	9,08	10,2	11,4	12,8	14,4	16,1	18,1
120	20,3	22,8	25,6	28,7	32,2	36,1	40,6	45,5	51,1	57,3
130	64,3	72,1	80,9	90,8	102,0	114,0	128,0	144,0	161,0	181,0

Kirjandus

Kirjanduse loetelus on kasutatud järgmist lühendit: «JAES» — «Journal of the Audio Engineering Society».

1. Altpere, E., Hanson, A. jt. Elektrimontööri käsiraamat. Tln., «Valgus», 1970.
2. Beranek, L. L. Sound systems for orchestra and grand opera. — «JAES», 1966, vol. 14, № 2 (April).
3. Bernstein, J. L. Audio systems. London, «John Wiley and Sons», 1966.
4. Bleazey, J. Experimental determination of the effectiveness of microphone wind screens. — «JAES», 1961, vol 9, №. 1 (January).
5. Bolle, G. Über die Wirkungsweise von Ionenlautsprechern. — «Nachr. Techn. Zeitschrift», 1958, H. 4, S. 172.
6. Borkvell, A. Matemaatilise analüüsi kursus. Tln., ERK, I osa 1956, II osa 1960.
7. Brown, R. L. and Bolt, R. H. — «JAES», 1942, vol. 13, p. 337.
8. Bulanov, I., Glagoljev, G. Elektroonika alused. Tln., «Valgus», 1968.
9. Crane, C. R., Brookes, G. A. Artificial reverberation facilities for auditoriums and audio systems. — «JAES», 1961, vol. 9, Nr. 3.
10. Dadson, R. S., King, J. H. A determination of the threshold of hearing and its relation to the standadization of audiometers. — «Journ. of. Laryngology and Otology», 1952, p. 498.
11. Daniel, E. D. The influence of some head and tape constants on the signal recorded on a magnetic tape. — «Proc. Inst. Electr. Engrs.» Part III, 100, 1953, Nr. 65 (May), p. 168—175.
12. Duhhota, T. Kinomehaaniku abi. Tln., «Valgus», 1966.
13. Eiskop, I. Elektronmööteriistad. I ja II osa. Loengukonspekt. Tln., TPI, 1962 ja 1963.
14. Elektriseadmete ehituse eeskirjad (EEE) 1...7. jagu, Tln., ERK, «Eesti Raamat», «Valgus» 1964...1968.
15. Elektroonika I, 3. trükk. Tln., TPI, 1971.
16. Etverk, E., Prinits, O. ja Vihman, A. Matemaatika X kl., Tln., «Valgus», 1969.
17. Firma «TESLA» katalog nr. 3418. Praha, 1969.
18. Godfrey, J. W. Studio engineering for sound broadcasting. London, 1965.
19. Görike, R. Neue Tauchspulen-Richtmikrophone. — «Funkschau», 1955, Nr. 1, S. 8.
20. Heinrichsen, V. Raadiotehnilised ahelad I. Tln., TPI, 1969.
21. Hohmuth, G. Zweikanalaufzeichnung von Schallplatten. — «Radio und Fernsehen», 1968, Nr. 20.
22. Jahn, G. Kurven gleicher Lautstärke für Oktavband passrauschen. — «Hochfrequenztech. u. Elektroakustik», 1959, S. 187.
23. Kahekanaliline heliplaadisalvestus. — «Tehnika ja Tootmine», 1969, Nr. 5.
24. Kangro, G. Matemaatiline analüüs. Tln., «Eesti Raamat», I osa, 1965, II osa 1968.
25. Kaszynski, G. Untersuchungen über die Ausgleichsvorgänge an Lautsprechern. — «Hochfrequenztech. u. Elektroakustik», 1957, H. 2, S. 37.
26. Khruschev, A. A. Sound systems for large multipurpose halls in the Soviet Union. — «JAES», 1970, Nr. 1 (February).
27. Knudsen, V. O. ja Harris, M. Acoustical designing in architecture. New York, 1950.
28. Koštšejev, I. A. Traatside teooria. Tln., ERK, 1962.
29. Kušnir, F. Raadiomõõtmised. Tln., «Valgus», 1970.

30. Kühne, F. Eckenlautsprecher mit 3D. — «Funkschau», 1955, H. 12, S. 260.
31. Künnap, E. Automaatreguleerimine. Tln., ERK, 1960.
32. Lueder, H. Zur Statistik der Intensitätsverteilung im Spektrum natürlicher Klangbilder. — «Wiss. Veröff. aus dem Siemens Konzern», 1930, Bd. IX, S. 167—225.
33. Marlens, W. S. Duration and frequency alteration. — «JAES», 1966, vol. 14, Nr. 2 (April).
34. Mehlich, G. Die Behandlung von Schallplatten. — «Radio und Fernsehen», 1966, Nr. 9.
35. Meinema, H. E., Johnson, H. A., Laube, W. C. A new reverberation device for high fidelity systems. — «JAES», 1961, vol. 9, Nr. 4 (Oct.).
36. Mihelson, V. A. Füüsika I. Tartu, «Teaduslik Kirjandus», 1946.
37. Neumann, L., Kalantarov, P. Elektrotehnika teoreetilised alused. I osa. Tln., ERK, 1964.
38. Neumann, L., Kalantarov, P. Elektrotehnika teoreetilised alused. II osa. Vahelduvvooluahelate teooria. Tln., «Valgus», 1966.
39. Neumann, L., Kalantarov, P. Elektrotehnika teoreetilised alused. III osa. Elektromagnetilise välja teooria. Tln., «Valgus», 1968.
40. Noble, J., Bird, R., A dual-band audio limiter. — «JAES», 1969, vol. 17, Nr. 6 (Dec.).
41. Okolotovitš, K. Videomagnetofonid — «Side, raadio, televisioon», 1966, Nr-d 4, 5 ja 6.
42. Olson, H. F. Acoustical engineering. London, 1967.
43. Olson, F. Passive and active acoustics in architectural enclosures. — «JAES», 1965, Nr. 4.
44. Oruvee, H. Vanadest ja uutest probleemidest arhitektuurilises akustikas — «Tehnika ja Tootmine», 1962, Nr. 9.
45. Pedusaar, H. Elektro- ja raadiotehnika algajaile. Tln., «Valgus», 1968.
46. Pedusaar, H. Helide maailmas. Tln., «Valgus», 1966.
47. Pedusaar, H. Unifitseeritud ,pistikud. — «Tehnika ja Tootmine», 1969, Nr. 4.
47a. Pedusaar, H. Kassetid, magnetofonid ja kassettmagnetofonid — «Tehnika ja Tootmine», 1971, Nr. 6.
48. Petzoldt, H. Elektroakustik, Band I. Leipzig, 1951.
49. Pjorõškin, A. ja Krauklis, V. Füüsika keskkoolile I. Tln., «Valgus», 1965.
50. Volkman, J. E. Polycylindrical diffusers in room acoustics design. — «JAES», 1942, (January).
51. Prinits, O. Funktsionaalne sõltuvus, tuletis ja integraal keskkoolis. Tln., ERK, 1963.
52. Putilov, K. A. Füüsika I. Tln., Eesti Raamat, 1964.
53. Põdrus, A. Elektrovaakuumseadised. Tln., ERK, 1955.
54. Rayleigh, J. W. Strutt. Theory of sound. Cambridge. I tr. 1877—1878, II tr. 1894—1896, III tr. 1926. Kordustrükid 1929, 1937.
Venekeelne tõlge: Дж. В. Стретт (Лорд Рэлей), Теория звука, Т. 1—2, М. «Гостехиздат», 1955.
55. Redlich, H. Messung der Lichtbandbreite auf Stereo-Schallplatten. — «Radio mentor», 1958, H. 10, S. 683.
56. Reichardt, W. Grundlagen der Technischen Akustik. Leipzig, «Akad. Verlagsgesellsch.», 1968.
57. Robinson, D. W. The relation between the sone and phone scales of loudness. — «National Physical Laboratory. Acustica», 1953, p. 344.
58. Rägo, G. Kõrgem matemaatika II. Differentsiaalarvutus. Tln., «Valgus».
59. Sarapu, Ed. Heliplaatide hooldamine. — «Tehnika ja tootmine», 1969, Nr. 5.
60. Schroeder, M. R. Natural sounding artifical reverberation. — «JAES», 1962, vol. 10, (July).
61. Schröder, F. K. Fortschritte im Lautsprecherbau. — «NTZ», 1958, H. 4, S. 169.
62. Schults, K. Mõõtühikud füüsikaliste suuruste mõõtmiseks. Tln., «Valgus», 1965.

63. Sillamaa, H. Automaatreguleerimine I. Tln., TPI, 1965.
64. Sillart, A. Mikrofoni tuule- ja vihmakaitse. — «Tehnika ja Tootmine», 1967, Nr. 5 (Mai).
65. Sillart, A. Stereofoonilise heli rakendamisest. — «Side, raadio, televisioon», 1967, Nr. 5.
66. Sillart, A. Televisioonitehnika. Tln., «Valgus», 1966.
67. Spratt, H. G. M. Magnetic tape recording. London, «Temple Press Books Ltd., 1964.
68. Studer, W. Multi-channel magnetic tape recorder A 80. Technical information. Zürich, «Willi Studer», 1970.
69. Tael, V. Müra. Tln., ERK, 1961.
70. Tajur, E. Stereofoonilise raadiolevi süsteemidest. — «Side, raadio, televisioon», 1966, Nr. 4.
71. Tajur, E. Väljatransistorite andmeid. — «Side, raadio, televisioon», 1969, Nr. 5.
72. Tammet, H. Väljatransistorid. — «Side, raadio, televisioon», 1969, Nr. 5.
73. Tremaine, H. M. The audio cyclopedia. New York, 1965.
74. Tööstusettevõtete elektriseadmete tehnilise ekspluatatsiooni ja ohutu teenindamise eeskirjad. Tln., RMN, 1963.
75. Umborg, J., Eiskop, I., Kollom, U. Elektroonika II. Elektronmõõteriistade kirjeldusi. Tln., TPI, 1969.
76. Vajda, Z. A studio tape recorder STM 210 of novel design. — «JAES», 1969, vol. 17, Nr. 6 (Dec.), p. 634—643.
77. Walker, P. J. Wide range electrostatic loudspeakers. — «Wireless Word», 1955, (May), p. 208—211.
78. Бабуркин В. Н., Гензель Г. С., Павлов Н. Н. Электроакустика и радиовещание. М., Связь, 1967.
79. Бернар М. Руководство по записи звука. М., 1962. (Госкомитет по радиовещанию и телевидению).
80. Белоруссов Н. И. Электрические кабели и провода. М. «Энергия», 1971.
81. Болотников И. М. Кинотеатральные громкоговорители. М. «Искусство», 1957.
82. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М., «ОГИЗ», 1948.
83. Власов Л. В., Вол В. С., Гошев Г. М. Диктофоны и их применение. Л. «Энергия», 1970.
84. Ганзбург М. Д., Микшеры. М., «Энергия», 1968.
85. Гладышев Г. И. Магнитофоны. Справочник. Киев, «Наукова Думка», 1969.
86. Гончаров А. В. и др. Техника магнитной видеозаписи. М., «Энергия», 1970.
87. Горон И. Е. Радиовещание. М., «Связьиздат», 1944.
88. Громкоговорители динамические диффузорные. «Радио», 1969, № 6.
89. Громкоговорители и звуковые колонки. Каталог «Изделия радиопромышленности», том V, М. 1969 (НИИ экон. и информ. по радиоэлектроники).
90. ГОСТ 13265—67. Ленты магнитные неперфорированные для звукозаписи.
91. ГОСТ 12368—66. Соединители штепсельные низкочастотные.
92. ГОСТ 11515—65. Тракты радиовещательные.
93. ГОСТ 8383—66. Устройства электропроигрывающие.
94. ГОСТ 8304—57. Измерительные магнитные ленты (тестфильмы).
95. ГОСТ 7893—61. Звукозапись механическая на диске.
96. ГОСТ 7765—61. Иглы для звукоснимателей алмазные и корундовые.
97. ГОСТ 5289—68. Пластинки граммофонные долгоиграющие.
98. Гутин Л. Я. ЖТФ, 1937, Вып. 10, VII. стр. 1096.
99. Дольник А. «Студийные микрофоны» — «Радио», 1969, № 1.
100. Дольник А. Транзисторные конденсаторные микрофоны. — «Радио», 1970, № 3.
101. Дрейзен И. Г. Системы электронного управления акустикой залов и радиовещательных студий. М., «Связь», 1967.
102. Ефимов Е. Г. Магнитные головки для звукозаписывающей аппаратуры в радиовещании. М. 1963. (Госкомитет по радиовещанию и телевидению).

103. Заславский с. Трехпрограммный громкоговоритель. — «Радио», 1970, № 3.
104. Индлин Ю. А. Новая модель пружинного ревербератора. — «Техника кино и телевидения», 1966, № 4 (апрель).
105. Иофе В. К. и Янпольский А. А. Расчетные графики и таблицы по электроакустике. М., ГЭИ, 1954.
106. Качерович А. Н. Акустическое проектирование киностудий и кинотеатров. М., «Госкиноиздат», 1952.
107. Колков В., Марков М. В. — Приемно-усилительные сверхминиатюрные металлокерамические лампы. — «Радио», 1965, № 7.
108. Конович Л. Стереофоническое радиовещание. — «Радио», 1960, № 4.
109. Карнаухов П. В. Корректирующие цепи усилителей звуковой частоты. Киев, «Техника», 1965.
110. Лендовер А., Штейн А. Магнитофон «Дайна» — «Радио», 1970, № 2.
111. Лютов С. Л. Индустриальные помехи радиоприему и борьба с ними. М., «ГЭИ», 1952.
112. Магнитные головки. Справочный листок. — «Радио», 1971, № 2.
113. Маньковский В. С. Акустика студий и залов для звуковопроизведения. М., «Искусство», 1966.
114. Международная организация радиовещания и телевидения (ОИРТ). Рекомендации технической комиссии.
115. Микровольтметр с квадратичным детектором В3-5. Паспорт, техническое описание и инструкция по эксплуатации. Таллин. Завод «Пунане РЭТ».
116. Милливольтметр импульсный В4-3. Паспорт, техническое описание, инструкция по эксплуатации. Таллин. Завод «Пунане РЭТ».
117. Митрофанов Ю., Пикерсгиль А. Усилители для акустических систем с электромеханической обратной связью. — «Радио», 1971, № 3.
118. Молодая Н. Т. Акустическое проектирование радиовещательных и телевизионных студий. М., «Связь», 1964.
119. Олсон Г. Динамические аналогии. М. ИИЛ, 1947.
120. Описание аппаратуры «Звук». — «Киномеханик», 1966, № 7...12; 1967, № 1...7.
121. Осипов Г. Л. Борьба с производственным шумом. М., «Знание», 1967.
122. Панфилов Н. Д. Усилители киноустановок. М., «Искусство», 1968.
123. Порто Д. Н. Статические магнитные поля тороидальных записывающих головок. — «Радиотехника», т. 7, 1952, № 2.
124. Паперное Л. З., Молодая Х. Д., Метер Ч. М. Расчет и проектирование систем озвучания и звукоусиления в закрытых помещениях. М., «Связь», 1970.
125. Радиотехнические устройства (Сборник государственных стандартов). (На 1-е сент. 1969 г.) М., Изд-во стандартов, 1969.
126. Ривкин Л. Расчет регуляторов тембра. — «Радио», 1969, № 1.
127. Рязанцев Г. Герконы. — «Радио», 1970, № 9.
128. Силламаа Х. В. Установление напряжения на выходе детектора. — «Труды Таллинского политехнического института». Серия А, № 207, 1963.
129. Справочник по радиотехнике. Под общ. ред. Б. А. Смиренина, М., «ГЭИ», 1950.
130. Февралева Н. Е. Магнитно-твердые материалы и постоянные магниты. Справочник. Киев, «Наукова думка», 1969.
131. Физические основы магнитной звукозаписи. А. А. Вороблевский, В. Г. Корольков, Я. А. Мазо и др. М., «Энергия», 1970.
132. Фурдуев В. В. Акустические основы вещания. М., «Связьиздат», 1960.
133. Фурдуев В. В. Электроакустика. М., ГИТТЛ, 1948.
134. Цыкин Г. С. Трансформаторы низкой частоты. М., «Связьиздат», 1955.
135. Шифман Д. Х. Громкоговорители. М., «Энергия», 1965.
136. Энциклопедия. Автоматизация производства и промышленная электроника. М., «Советская энциклопедия», 1963.
137. Эрглис К. Э. и Степаненко И. П. Электронные усилители. М., «Наука», 1964.
138. Черкунов В. Электропроигрыватель. — «Радио», 1972. № 2.
139. Пташенчук Ю. Предварительный усилитель для электропроигрывателя. — «Радио», 1972, № 2.

Kasutatavamad tähised

a — kiirendus; lindi magnetkihi paksus
B_r — jääkinduktsioon T
C — elektrimahtuvus
C_M — elastsus (elastsustegur) m/N
D — dünaamikapiirkond
c — heli levimiskiirus
c_0 — heli levimiskiirus normaalrõhul ja -temperatuuril
E — elektromotoorjõud
$\mathbf{E}$ — helienergia tihedus
F — jõud N
f — sagedus
H — magnetvälja tugevus A/m
H_c — koertsitiivjõud
I — voolu tugevus A
$\mathbf{I}$ — heliintensiivsus W/m³
J — magneetumisintensiivsus
K — ülekandetegur
$k=2\pi f/c=2\pi/\lambda$ — lainearv
L — induktiivsus
$\mathbf{L}$ — helivaljus foonides
l — pikkus
m — mass kg
N — helinivoo dB
$\mathbf{N}$ — demagneetumistegur
$n=w_2/w_1$ — trafo ülekandetegur
P — võimsus W
p — helirõhk Pa
Q — hüvetegur
R — elektriline aktiivtakistus
R_M — magnetiline takistus
r — viskoosne hõõrdetakistus N·s/m
S — pindala m²
s — paigutus
T — reverberatsiooniaeg s
t — aeg s
U — pinge efektiivväärtus V
U_m — siinuselise pinge amplituudiväärtus
u — pinge hetkväärtus
V — ruumala m³
v — kiirus m/s
w — keerdude arv
x — kaugus, paigutus
Z — elektritakistus
z — mehaaniline takistus

α — helineeldumistegur
β — helipeegeldustegur
Γ — telgkontsentratsioonitegur

δ — õhupilu laius
ε — tundlikkus
Θ — suunanurk
$\varkappa = \gamma_p/\gamma_v$ — õhu erisoojuste (soojusmahtuvuste) suhe
λ — lainepikkus
μ — suhteline magnetiline läbitavus
ϱ — õhu tihedus kg/m^3; ümardusraadius
δ — heliisolatsioonitegur
τ — ajakonstant; viiteaeg
Φ — magnetvoog
Ω — ruuminurk steradiaanides (sr)
$\omega = 2\pi f$ — nurksagedus rad/s

Aineregister

aktiivse akustikaga ruum 23
aktiivtakistusest tüüritud süsteem 84
akustika 23
akustiline baar 8
— elastsus 48
— filter 39
— mass 48
— tagasiside 133
— takistus 8, 48
— telg 98
— trafo 49
— võimsus 62, 63, 97, 98
algsumbumus 148
artikulatsioonilised katsed 12
arusaadavus 12
atenuaator 140
avade heliisolatsioon 38

bimorfne element 61, 92, 93, 211
binauraalefekt 13

Chladni kujundid 52

detonatsioon 21
diferentssignaal 157, 205
difraktsioonmoonutused 70
difuusne heliväli 25, 31
dünaamikapiirkond 14

ebasümmeetriline liin 159
elastsusest tüüritud süsteem 86, 92
elastsusjõud 42
elastsusmoodul 42
elastsustegur 42
elektriline analoog 44
— analoogskeem 53
elektroakustiline helikanal 137, 139
elektromehaaniline muundur 41, 54
— sidetegur 55, 59, 61
eraldussagedus 151

faasimoonutus 19
filter 150
fonograaf 205
foon 10
foonika 138
füüsikaline akustika 24

geomeetriline akustika 24
gofreerimine 78, 100
grammofoninõel 207

hajuparameetritega süsteemid 50
heli kiirus 7
— maskeerimine 12
helienergia tihedus 9
heliintensiivsus 9
heliisolatsioon 37
helikandja 204
helikindlad uksed ja aknad 38
helikäpp 214
helilaine 7
helineeldematerjalid 32
helineeldumistegur 25
helinivoo 11
helipea 211
— montaaž 214
helipeegeldustegur 25
helipilt 149, 153, 229
helipult 163
helirada 173
helirõhk 7
helisignaali reguleerimine 154
helivaljus 10
heliväli 7
helivälja gradient 72
Helmholtzi resonaator 46
hääl 7

inertsjõud 42
impulssmeeter 156
isofoonsed jooned 12

jadalülitus 44
jäikus 42

kaheribaline piiraja 169
kaja 24
kajaimpulsside jada 217
kajanähe 179
kajaruum 220
kajata ruum 99
kajaülekanne 45
kassettmagnetofon 172
keelrelee 172
kerakiirgus 63
keralaine 7, 9
kiirgustakistus 62
kolbkiirgur 64
kompenseeritud helitugevusregulaator 12
kondensaatorvaljuhääldi 116
kopeernähe 179

kustutusdrossel 176
kustutusefekt 179
kuuldelävi 10
kõlar, invertor- 112
— kahekanaliline 127
— püstik- 120
— radiaal- 123
kõlalaud 101, 110
külgjõu kompensaator 214
külglõige 205

lainearv 8
liitruupor 119
lindi demagneetimine 170, 175
lindiveomehhanism 172, 200
lõikekiirus 208, 210
lõikepea 204, 209
lõikesagedus 196
lõiketera 205

maandamine 162
maandusklemm 162
magnetofonilint 180
massist tüüritud süsteem 83
matriits 205
mehaaniline takistus 43
— võnkesüsteem 42
membraan 52
mikrofon, dünaamiline 78
— kondensaator- 85
— liit- 73, 82
— lint- 82
— mõõte- 90
— piesoelektriline 92
— pooljuht- 93
— süsi- 93
— stereo- 76
mikrofoni tundlikkus 70, 72
mikrofonide paigutus 77, 153
mikrolift 215
mikrolõige 207
mikserseade 146
mittelineaarmoonutus 19, 214
muundur, elektrodünaamiline 56
— elektromagnetiline 57
— elektrostaatiline 59

— induktiivne 56
— magnetostriktsioon- 59
— piesoelektriline 61
mürad 20
müramõõtur 12
müranivoo 40

neliklemm 54

optiline helisalvestus 204

paskal 8
passiivse akustikaga ruum 23
peegeldusjälg 210
piiraja 169
piluefekt salvestusel 179
piluefekt taasestusel 188
plaadilõikepink 204
plaat 52
põiksalvestus 205
pööratavus 205

raadiostuudio 23, 31
rakord 172
rekorder 204, 206, 209
reverberatsioon 25, 218
reverberatsiooniaeg 27, 28, 219
ruupor 67
rööplülitus 44

sagedusala 13
sagedusmoonutus 19
segusti 146
silindriline difuusor 36
soon 12
standardne helirõhk 98, 101, 108
— väljundnivoo 81
startnupp 215
statistilis-dünaamiline spekter 16
statistilis-subjektiivne ekspertiis 17
stereohelipea 213
stereomikser 149
stereoplaat 205, 213
stereosignaal 73, 157
stroboskoop 204
stuudio 138
sujupaiguti 215
sumbumus 141
sumbumustegur 141
summuti 224
suunakarakteristik 65, 74
suunakarakteristiku tegur 65, 98
sõlmlülitus 44
sümmeetriline liin 159
süvasalvestus 205

tasalaine 7, 8
tasemediagramm 139
tehisreverberatsioon 217
televisioonistuudio 23
telgkontsentratsioonitegur 99
testlint 198
toonarm 214
toonmeister 138
tuulesumbumus 94
täisnivoo 154

universaalpea 172

vaheplaat 205
valjuhääldi, abonent- 124
— elektrodünaamiline 100

— elektromagnetiline 116
— elektrostaatiline 115
— ioon- 116
— kasutegur 110
— ruupor- 116
— sageduskarakteristik 105
— sisendtakistus 103
valjuhääldite faseerimine 124
— eraldusfiltrid 151
valulävi 10
varjestamine 160
ventilatsioonimürad 39
vertikaallõige 205
videomagnetofon 190
viitlüli 217
viskoosne hõõrdejõud 42
vookiirus 48
võnkekiirus 8

ööne elastsus 47

ühitatavus 205
ülemtoonid 13

Ильмар Эйскоп, Александер Силларт. ЭЛЕКТРОАКУСТИКА И ОЗВУЧЕНИЕ ПОМЕЩЕНИЙ. На эстонском языке. Издательство «Валгус». Таллин.
Toimetaja L. Abo. Kunstiline toimetaja M. Niin. Tehniline toimetaja M. Kukerman. Korrektor L. Lipinskaja. Laduda antud 31. VIII 1972. Trükkida antud 12. VII 1973. Kohila Paberivabriku trükipaber nr. 2, 60×90/16. Trükipoognaid 15,25. Arvestuspoognaid 14,52. Trükiarv 6000. MB-05567. Kirjastus «Valgus». Tallinn, Pärnu mnt. 10. H. Heidemanni nim. Trükikoda. Tartu, Ülikooli 17/19. 1. Tellimuse nr. 5115. Hind 83 kop.

83 kop.

A
33390
7852256

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00785225 6