

ELEKTROAKUSTIKA



Vitālija Aišpura redakcijā

2022

“Iztēle ir svarīgāka
nekā zināšanas”

Alberts Einšteins

Pitagoram, Furjē, Omam un REMT'am

ELEKTROAKUSTIKA

Mācību grāmata

Vitālija Aišpura redakcijā

RTU Izdevniecība
Rīga 2022

Autors izsaka pateicību recenzentiem profesoram *Dr. sc. ing. G. Balodim*, docentam *Dr. sc. ing. M. Zeltiņam*, SIA "3S" audioinženierim *Mg. sc. ing. S. Žizņevskim* par labojumiem, papildinājumu un ieteikumiem.

Vitālijs Aišpurs. Elektroakustika. Mācību grāmata. Rīga: RTU Izdevniecība, 2022, 220 lpp.

Grāmata paredzēta Rīgas Tehniskās universitātes studiju programmas "Viedās elektroniskās sistēmas" bakalaura un maģistra programmu studentiem, kā arī tiem interesentiem, kuri vēlas paplašināt savas zināšanas elektroakustikas jomā, jo ietvertais materiāls krietni pārsniedz studiju programmas ietvaru. Darbā ir izklāstītas cilvēka dzirdes īpatnības, skaņas viļņu fizika, elektromehāniskās analogijas metode un elektroakustisko pārveidojumu teorija. Apskatīti arī konkrēti elektroakustisko pārveidotāju tipi. Ir izklāstīta mikrofonu un skaļruņu uzbūve un to darbības principi. Aplūkota austiņu un mobilo telefonu uzbūve un darbība. Katras nodaļas beigās ir jautājumi atmiņai un prāta treniņam.



Recenzenti
Dr. sc. ing. G. Balodis
Dr. sc. ing. M. Zeltiņš
Mg. sc. ing. S. Žizņevskis

Redaktore Dzintra Birnbauma
Tehniskā redaktore Marta Ņikitenko
Datorsalikums un mākslinieciskais noformējums Paula Lore
Vāka dizains Paula Lore

© Rīgas Tehniskā universitāte, 2022

ISBN 978-9934-22-646-5 (pdf)
ISBN 978-9934-22-645-8 (print)

Izmantotie apzīmējumi un saīsinājumi	6
Priekšvārds	12
Ievads	14
1. CILVĒKA DZIRDES FIZIOLOĢIJA	16
1.1. Auss	17
1.2. Aizture	18
1.3. Dzirde	19
1.4. Binaurālā uztvere	20
1.5. Dzirdes virziens	21
1.6. Dzirdes atmiņa	21
1.7. Skaņa un trokšņi	22
1.8. Subjektīvā uztvere un attieksme	22
 Atmiņas un prāta treniņam	23
2. SKAŅAS FIZIKĀLIE PARAMETRI	24
2.1. Viļņu ģenerācija. Atsperes svārstis, harmoniskas sinusoidālas svārstības, virzulis	25
2.2. Akustiskais lauks. Skaņa vidē, daļiņu kustība un to pārvietošanās ātrums, viļņu formas, viļņu pretestība	26
2.3. Skaņas intensitāte. Skaņas izplatīšanās, skaņas ātrums, viļņa garums un frekvence, vispārējie frekvenču diapazoni un to lietojums	31
2.4. Audiofrekvenču diapazons	37
2.5. Saliktas svārstības. Harmonikas, fāze, oktāvas, mērījumu joslas, spektrs, troksnis	37
2.6. Skaņas līmeņa mērījumi. Sinusoidāla signāla mērījumi	49
2.7. Skaļuma līmenis. Skaļums, skaļums un joslas platums, tembrs, runa, skaņas augstums un intervāli, toņa vai skaņas forma, muzikālā skala	54
 Atmiņas un prāta treniņam	66
3. SKAŅA ATKLĀTĀ LAUKĀ	69
3.1. Brīvais lauks	70
3.2. Skaņas izplatība – diverģence	70
3.3. Skaņas intensitāte brīvā laukā	71
3.4. Skaņas spiediens brīvā laukā	72
3.5. Brīvā lauka skaņas diverģence	73
 Atmiņas un prāta treniņam	74
4. TELPU AKUSTIKA	75
4.1. Skaņas lauki slēgtā telpā	76
4.2. Atstarošanās	78
 Atmiņas un prāta treniņam	87
5. DIFRAKCIJA	88
5.1. Difrakcija un viļņa frontes izplatība	89
5.2. Difrakcija un viļņa garums	90
5.3. Difrakcija ap šķēršļiem	90
 Atmiņas un prāta treniņam	92

6.	REVERBERĀCIJA	93
6.1.	Skaņas spiediena līmeņa pieaugums telpā	95
6.2.	Difūzais akustiskais lauks	96
6.3.	Sabines formula	98
6.4.	Absorbcija gaisā	98
	Atmiņas un prāta treniņam	99
7.	ELEKTROMEHĀNISKIE PĀRVEIDOTĀJI	100
7.1.	Elektromehānisko pārveidotāju iedalījums	102
7.2.	Elektromehānisko pārveidotāju apvēršamība	104
7.3.	Dinamiskā analogija	106
	Atmiņas un prāta treniņam	109
8.	SLĒGUMU SHĒMAS UN TO KOMPONENTES	110
8.1.	Shēmu analīzes principi	111
8.2.	Akustisko, mehānisko un elektrisko shēmu elementu savietojamība	112
	Atmiņas un prāta treniņam	113
9.	ELEKTROMEHĀNISKĀ ANALOĢIJA. MEHĀNISKIE ELEMENTI UN TO ELEKTRISKIE ANALOĢI	114
9.1.	Mehānisko komponentu attēlojums	115
9.2.	Impedance, admittance un kustīgums	115
9.3.	Mehāniskā impedance un kustīgums	117
9.4.	Mehāniskā pretestība	118
9.5.	Mehāniskā elastība	119
9.6.	Masa	121
9.7.	Sviras	122
9.8.	Ģenerators	124
9.9.	Jaudas izteiksmes	125
	Atmiņas un prāta treniņam	125
10.	ELEKTROAKUSTISKĀ ANALOĢIJA	126
10.1.	Akustisko slēgumu elementi	127
10.2.	Vilņi caurulēs	127
10.3.	Akustiskā impedance	131
10.4.	Akustiskā kapacitāte	132
10.5.	Akustiskā kapacitāte ar stingru diafragmu	136
10.6.	Akustiskā masa	137
10.7.	Akustiskā pretestība	140
	Atmiņas un prāta treniņam	142
11.	MIKROFONI	143
11.1.	Spiediena mikrofons	145
11.2.	Spiediena gradienta mikrofons	147
11.3.	Kombinētais spiediena un spiediena gradienta mikrofons	151

Saturs

11.4.	Spiediena mikrofonu lietojums	153
11.5.	Dinamiskie jeb elektromagnētiskie mikrofoli	154
11.6.	Elektrostatiskie mikrofoli	160
	Atmiņas un prāta treniņam	165
12.	ELEKTRODINAMISKIE SKAĻRUŅI	166
12.1.	Skaļruņa konstrukcija	168
12.2.	Magnētiskā sprauga un skaņas spolīte	170
12.3.	Difuzors	174
12.4.	Tīles-smola (thiele-small) parametri	175
12.5.	Difuzora kustība pie dažādām frekvencēm	177
12.6.	Skaļruņa parametru mērīšana	179
12.7.	Skaļruņa jutība	180
12.8.	Skaļruņa elektriskā ieejas impedance	181
12.9.	Skaļruņa frekvenču raksturlīkne un skanējuma kvalitāte	183
12.10.	Akustiskais panelis un korpuss	186
12.11.	Bezgalīga izmēra panelis	188
12.12.	Slēgts korpuss	188
	Atmiņas un prāta treniņam	190
13.	AUSTIŅAS	192
13.1.	Austiņu iedalījums	193
13.2.	Austiņu konstrukcija	195
13.3.	Akustiskā vide	197
13.4.	Elektrodinamiskās austiņas	200
13.5.	Elektrostatiskās austiņas	202
	Atmiņas un prāta treniņam	202
14.	MOBILO TELEFONU AKUSTIKA	204
14.1.	Akustiskās sistēmas uzbūve	205
14.2.	Akustiskās sistēmas ekvivalentā shēma	206
14.3.	Akustiskais zemfrekvences filtrs (helmholca rezonators)	208
	Atmiņas un prāta treniņam	209
15.	KAM DOMĀTAS AUSIS	210
15.1.	Vēlreiz, kam tās domātas	211
15.2.	Dzirdes bojājumi	211
15.3.	Cik skaļi ir pārāk skaļi	212
15.4.	Dzirdes bojājumu indikatori	213
15.5.	Dzirdes aizsardzība	214
15.6.	Koncertu apmeklētāju un citu klausītāju dzirdes aizsardzība	216
15.7.	Sabiedrības aizsardzība	216
15.8.	Pārāk daudz labu lietu	217
	Atmiņas un prāta treniņam	218
Izmantotā un ieteicamā literatūra		219

IZMANTOTIE APZĪMĒJUMI UN SAĪSINĀJUMI

Latīņu alfabēts

<i>a</i>	Paātrinājums, m/s^2
<i>AC</i>	maiņspriegums vai maiņstrāva
<i>ACC</i>	digitālās audio skaņas kodēšanas formāts
<i>AM</i>	amplitūdas modulācija
<i>ANSI</i>	Amerikas Nacionālais Standartu institūts
<i>B</i>	magnētiskā indukcija, T; magnetiskā plūsma, Wb
<i>BW</i>	frekvenču joslas platums, Hz
<i>c</i>	skaņas ātrums, m/s
<i>C</i>	sprieguma formas koeficients, kapacitāte, F
<i>c₀</i>	skaņas ātrums normālapstākļos, 343 m/s
<i>C_A</i>	akustiskā elastība, m^3/Pa , akustiskā kapacitāte, m^5/N
<i>C_{AB}</i>	dinamiskā mikroфона akustiskā kapacitāte aiz diafragmas, kondensatoru mikroфона apakšējās kameras akustiskā elastība, skandas tilpuma akustiskā elastība, m^3/Pa
<i>C_{AF}</i>	dinamiskā mikroфона gaisa telpas pirms diafragmas elastība, atsperes elastība, m^3/Pa
<i>C_{AG}</i>	dinamiskā mikroфона gaisa telpas aiz diafragmas elastība, kondensatoru mikroфона starpklājumu spraugas akustiskā elastība, m^3/Pa
<i>C_{AS}</i>	kondensatoru mikroфона akustiskā elastība, skandas akustiskās saspiešanas elastība, m^3/Pa
<i>C_{E0}</i>	kondensatoru mikroфона miera stāvokļa kapacitāte, F
<i>cents</i>	logaritmiska toņu intervālu mērvienība, $^{1200}\sqrt{2} = 1,000577$
<i>C_M</i>	mehāniskā elastība, m/N
<i>C_{MS}</i>	dinamiskā mikroфона gofras elastība, m/N
<i>d</i>	diametrs, kondensatoru mikroфона starpklājumu attālums, m
<i>dB</i>	relatīva logaritmiska mērvienība
<i>DC</i>	līdzspriegums vai līdzstrāva
<i>dx</i>	strāvas vadītāja pārvietojums magnetiskajā laukā, m
<i>dφ</i>	magnētiskās plūsmas izmaiņas, Wb

<i>e</i>	maiņspriegums, slogota kondensatoru mikroфона izejas spriegums, V
<i>E</i>	kondensatoru mikroфона polarizācijas spriegums, V
<i>e₀</i>	kondensatoru mikroфона vaļējas ķēdes spriegums, V
<i>e_G</i>	panelī stiprināta skaļruņa ģenerators spriegums, V
<i>EN</i>	Eiropas normas
<i>EPA</i>	vides aizsardzības aģentūra
<i>ERB</i>	ekvivalentās taisnstūrjoslas platums, Hz
<i>exp</i>	eksponente
<i>f</i>	svārstību frekvence, Hz
<i>F</i>	spēks, N
<i>f_b</i>	skaļruņa rezonanses frekvence tilpumā, Hz
<i>f_{lim}</i>	robežfrekvence, Hz
<i>FM</i>	frekvences modulācija
<i>f_s</i>	skaļruņa rezonanses frekvence brīvā laukā, Hz
<i>grad</i>	gradients, leņķa mērvienība
<i>h</i>	augstums, m
<i>HF</i>	augstās frekvences
<i>I</i>	skaņas intensitāte, W/m ² ; strāva, A
<i>i</i>	maiņstrāva, A
<i>I₀</i>	nulles līmeņa skaņas intensitāte, 10 ⁻¹² W/m ²
<i>IEC</i>	starptautiskā elektrotehnikas komiteja
<i>I_{p-p}</i>	strāvas lielums pīķis – pīķis, A
<i>I_{rms}</i>	strāvas efektīvā vērtība, A
<i>ISO</i>	starptautiskā standartu organizācija
<i>I_{vid}</i>	strāvas vidējā vērtība, A
<i>j</i>	imagināra lieluma indekss
<i>k</i>	viļņa numurs, m ⁻¹
<i>K1</i>	ģeneratoriskā režīma elektromehāniskās saites koeficients
<i>K2</i>	motoriskā režīma elektromehāniskās saites koeficients
<i>k_M</i>	atsperes konstante, N/m
<i>l</i>	garums, m

L	induktivitāte, H
L_{EC}	panelī ievietota skaļruņa spolītes induktivitāte, H
LF	zemās frekvences
L_I	skaņas intensitātes līmenis, dBI
L_p	skaņas spiediena līmenis, dB SPL
L_w	skaņas jaudas līmenis, dB
m	masa, kg, gaisa vājinājuma konstante, 1/m
M	gāzes molekulmasa, kg
M_A	akustiskā masa, kg/m ⁴
M_{AA}	dinamiskā mikroфона putekļu ekrāna akustiskā masa, kondensatoru mikroфона gaisa akustiskā masa, kg/m ⁴
$Mach \cdot n$	Maha skaitlis, (343m/s)·n
M_{AD}	kondensatoru mikroфона membrānas akustiskā masa, kg/m ⁴
M_{AH}	dinamiskā mikroфона perforēta ekrāna akustiska masa, kg/m ⁴
M_{AR}	skandas akustiskā starojuma masa, kg/m ⁴
M_{AS}	dinamiskā mikroфона putekļu ekrāna akustiskā masa, kg/m ⁴
MF	vidējās frekvences
M_M	mehāniskā masa, kg
M_{M1}	skaļruņa difuzora gaisa masa, kg/m ⁴
M_{MD}	dinamiskā mikroфона diafragmas, skaļruņa difuzora un spolītes masa, kg
M_{MRb}	skaļruņa panelī aizmugures mehāniskā starojuma masa, kg
M_{MRF}	skaļruņa panelī priekšpusē mehāniskā starojuma masa, kg
M_{MS}	skaļruņa kopīgā kustīgā masa, kg
$MP3$	skaņas digitālā ieraksta formāts
n	vesels, pozitīvs skaitlis
$NIOSH$	Nacionālais darba drošības un veselības institūts
$OSHA$	darba drošības un veselības uzraudzības iestāde
P	spiediens, Pa
p	efektīvais spiediens, Pa
p_0	efektīvais spiediens pie skaņas intensitātes I_0 : $2 \cdot 10^{-5}$, Pa
P_0	nulles līmeņa jauda, 0,001 W

p_B	spiediens aiz diafragmas, Pa
P_{ef}	spiediena efektīvā vērtība, Pa
<i>fons/phon</i>	skaļuma līmeņa mērvienība
p_{nom}	skaņas spiediena momentānā vērtība, Pa
P_{rel}	relatīvais spiediens, Pa
P_{rms}	spiediena efektīvā vērtība, Pa
<i>PTS</i>	pastāvīga dzirdes sliekšņa nobīde
Q	filtra labums, tilpuma ātrums – plūsma, m^3/s ; elektriskais lādiņš, C
Q_{ES}	skaļruņa elektriskais labums
Q_{MS}	skaļruņa mehāniskais labums
Q_{TS}	skaļruņa kopējais labums
r	rādiuss, m
R	attālums, m, universālā gāzu konstante, elektriskā pretestība, Ω
R_A	akustiskā pretestība, $N \cdot s/m^5$
R_{AA}	kondensatoru mikroфона gaisa akustiskā pretestība, $N \cdot s/m^5$
R_{AG}	dinamiskā mikroфона akustiskā pretestība aiz diafragmas, $N \cdot s/m^5$
R_{AH}	dinamiskā mikroфона ekrāna un diska akustiskā pretestība, $N \cdot s/m^5$
R_{AR}	skandas akustiskā starojuma pretestība, $N \cdot s/m^5$
R_{AS}	dinamiskā mikroфона putekļu ekrāna akustiskā pretestība, kondensatoru mikroфона membrānas akustiskā pretestība, skandas akustiskās saspiešanas pretestība, $N \cdot s/m^5$
R_E	skaļruņa spolītes elektriskā pretestība, Ω
R_{EG}	skaļruņa panelī ģeneratora izejas pretestība, Ω
R_{ES}	skaļruņa akustiskā pretestība, $N \cdot s/m^5$
R_M	mehāniskā pretestība, $N \cdot s/m$
r_M	mehāniskā admitance – kustīgums, $m/N \cdot s$
R_{MRb}	skaļruņa panelī aizmugures starojuma impedances reālā daļa, $N \cdot s/m^5$
R_{MRf}	skaļruņa panelī priekšpusē starojuma impedances reālā daļa, $N \cdot s/m^5$
<i>RMS</i>	vidējā kvadrātiskā vērtība (apzīmē arī ar X_{rms})
R_{MS}	skaļruņa saspiešanas mehāniskā pretestība, panelī stiprināta skaļruņa mehāniskās saspiešanas impedance, $N \cdot s/m$

<i>S</i>	skaļums, sons, laukums, m ²
<i>S_D</i>	mikrofona diafragmas efektīvais laukums, m ²
<i>SI</i>	starptautiskā mērvienību sistēma
<i>sons</i>	skaļuma mērvienība
<i>SPL</i>	skaņas spiediena līmenis, dB SPL
<i>t</i>	laiks, s
<i>T</i>	perioda ilgums, s
<i>T</i>	absolūtā temperatūra, Kelvins
<i>t⁰</i>	vides temperatūra, °C
<i>T_c</i>	vides temperatūra, °C
<i>TTS</i>	dzirdes sliekšņa nobīde laikā
<i>U</i>	Pointinga vektors, spriegums, V, tilpuma ātrums, m ³ /s
<i>u</i>	akustiskais ātrums, m/s
<i>U_D</i>	dinamiskā mikroфона diafragmas tilpuma ātrums, kondensatoru mikroфона gaisa tilpuma ātrums, panelī stiprināta skaļruņa difuzora tilpuma ātrums, m ³ /s
<i>U_H</i>	dinamiskā mikroфона gaisa tilpuma ātrums caur disku, m ³ /s
<i>UHF</i>	ultra augstas frekvences
<i>U_{p-p}</i>	sprieguma amplitūda pīķis–pīķis, V
<i>U_{rms}</i>	sprieguma efektīvā vērtība, V
<i>U_{vid}</i>	sprieguma vidējā vērtība, V
<i>v</i>	ātrums, km/h
<i>V</i>	tilpums, m ³
<i>V_{AB}</i>	skandas tilpums, m ³
<i>V_{AS}</i>	skaļruņa ekvivalentais tilpums, m ³
<i>VHF</i>	ļoti augstas frekvences
<i>V_{MS}</i>	panelī stiprināta skaļruņa difuzora mehāniskā elastība, N·s/m
<i>v_{nom}</i>	skaņas ātruma momentānā vērtība, m/s
<i>W</i>	enerģija, J
<i>WHO</i>	pasauls veselības organizācija
<i>x</i>	attālums, m
<i>X_A</i>	akustiskā reaktance, N·s /m ⁵

Y	kustīgums, $m/(N \cdot s)$
Y_A	akustiskā admitance, $m^5/(N \cdot s)$
Y_M	mehāniskā admitance, $m/(N \cdot s)$
Z	divvadu gaisa līnijas viļņa pretestība, impedance, Ω
Z_A	akustiskā impedance, $N \cdot s/m^5$
Z_{AR}	skandā ievietota skaļruņa starojuma impedance, $N \cdot s/m^5$
Z_E	elektriskā impedance, Ω
Z_{EL}	dinamiskā mikroфона elektriskās slodzes impedance, Ω
Z_{EM}	skaļruņa mehāniskā impedance, $N \cdot s/m$
Z_{ES}	skaļruņa akustiskā impedance, $N \cdot s/m^5$
Z_L	slodzes impedance, Ω
Z_M	mehāniskā impedance, $N \cdot s/m$
Z_S	viļņu pretestība, Ω

Grieķu alfabēts

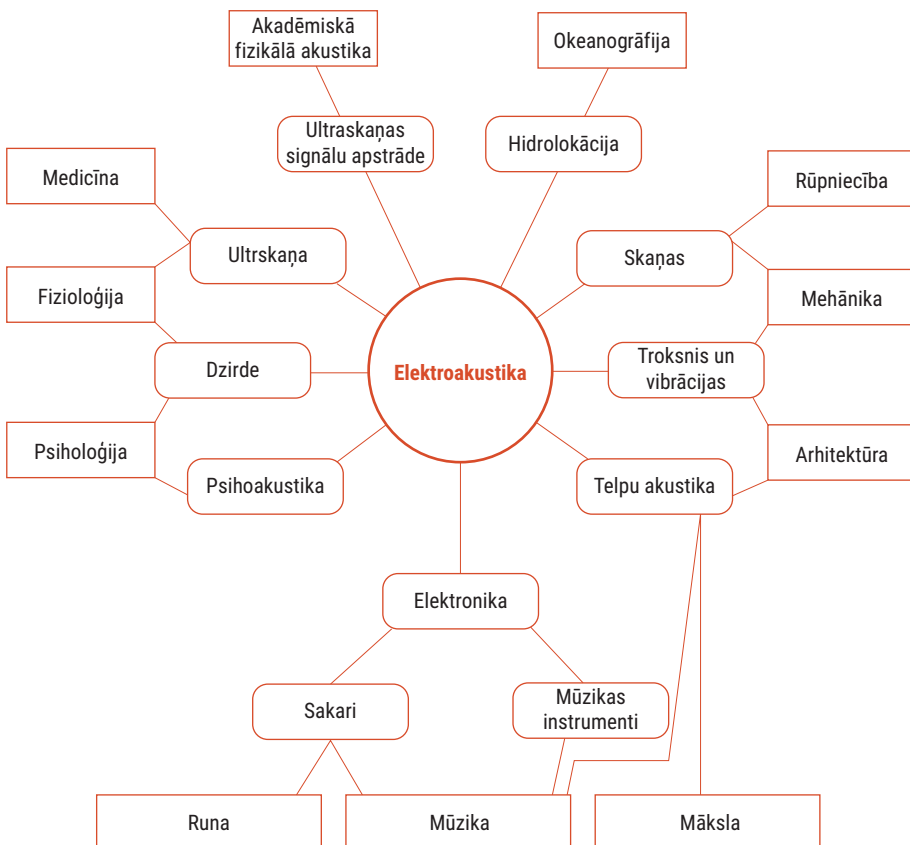
α	absorbcijas koeficients
$\Delta\phi$	fāžu nobīde, leņķis, $^\circ$
η	viskozitāte, $N \cdot s/m^2$
λ	viļņa garums, m
π	konstante 3,14159265359
ρ	blīvums, kg/m^3
γ	adiobātiskais indekss
ϕ	fāze, leņķis, $^\circ$
ω	leņķiskā frekvence, rad
ε	skaņas blīvums, $W \cdot s/m^3$
ε_0	skaņas blīvums pie I_0, c_0 : $3 \cdot 10^{-15} W \cdot s/m^3$
τ	laika aizture, s
θ	virziena noteikšanas sajūtu precizitāte, $^\circ$

PRIEKŠVārds

Elektroakustika ir zinātne par akustisko svārstību pārvērtībām elektriskajās un pretēji. Tā apkopo un ir balstīta uz triju tehnisko nozaru – akustika, mehānika un elektronika – zināšanām. Tās ir pamatnozares, taču neiztikt arī bez daudzām saistītām nozarēm (1. att.). Ar elektroakustiku ir saistīts gan izstrādātājs, gan lietotājs, un tā ir gandrīz ikvienā tehniskā sistēmā, kas komunicē ar cilvēku. Profesionāļi elektronikā, datorzinātnē, kā arī ciparsignālu apstrādes speciālisti ir saistīti ar elektroakustikas procesiem un iekārtām.

Pašsaprotama interese par šo priekšmetu ir radio, televīzijas un ierakstu studiju profesionāļiem. Datorspēles, virtuālā realitāte – arī tur ir elektroakustikas klātesamība.

Mikrofoni un skaļruņi ir zināmākās un populārākās elektroakustikas ierīces. Tās ir visur: mājā, mobilajā telefonā, automobilī, sporta arēnā un pat



1. att. Elektroakustika un saistītās nozares.

baznīcā. Šie izstrādājumi ir galvenie sabiedrības modernajā komunikācijā, jo palīdz uztvert un pārraidīt informāciju.

Mikrofoni un skaļruņi ne vienmēr darbojas vidē, par kuru izstrādātājiem ir pietiekami daudz zināšanu. Arbitrs komunikācijas kvalitātei vienmēr ir klausītājs – indivīds. Un nav divu vienādu klausītāju, kuru vērtējums būtu identisks. Vērtējumā ir daudz subjektivisma. Tā kā elektroakustika ir multidisciplināra inženierzinātnes nozare, tad jebkurai elektroakustikas izstrādei ir jāmeklē kompromisa risinājums (*vilks paēdis un kaza dzīva*). Tas viss vērš elektroakustiku par izaicinājumu pilnu un aizraujošu darbības lauku.

IEVADS

Elektroakustikas pamatzudevums ir akustiskās enerģijas pārveidošanas elektriskajā izpēte un realizācija un arī pretējais process. Balstoties uz pētījumiem un atziņām, ir jāizstrādā sistēmas skaņas uztveršanai, saglabāšanai un reproducēšanai audio diapazonā no **20 Hz līdz 20 000 Hz**. Tomēr šis diapazons nav pietiekams, lai nodrošinātu atbilstošu kvalitāti.

Kvalitatīvai skaņas reproducēšanai ne mazāk svarīgi ir nodrošināt līmeņu attiecību un laika aizturi starp dažādām audiosignāla spektra daļām. Tāpat ir svarīgi, lai audiosignāls dzirdes diapazonā būtu brīvs no trokšņiem, lai tas netiktu vājināts un kropļots. Reproducējot skaņu, ne mazāk svarīgas ir telpu akustiskās īpašības. Elektroakustiskajām sistēmām nevajadzētu izjaukt telpu akustisko lauku un to reverberācijas parametrus. Vienkāršoti var teikt:

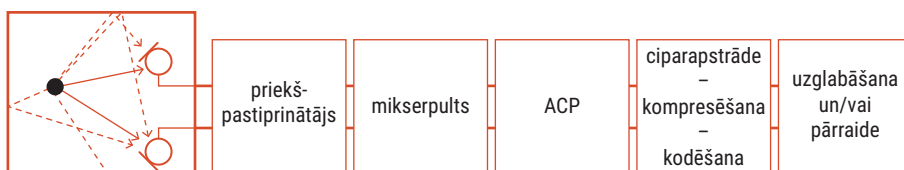
- minimāli kropļot oriģinālsignālu;
- veicot tiešapstrādi, ienest minimālu signāla aizturi.

Aplūkosim divas elektroakustikas sistēmas (2. att.).

2. attēla a redzams, kā tiek veikts balss vai mūzikas instrumenta skaņas ieraksts. Attēls b ilustrē skaņas ieraksta reproducēšanu vai elektronisku ierīču sintezētas skaņas atskaņošanu. Ilustrācijā redzams, ka skaņa vai pirmatnējais elektriskais signāls iziet caur daudzām sistēmas ierīcēm un katra no tām var izmainīt skaņas kvalitāti. Signālu ceļā no avota līdz mikrofonam un no skaļruņa līdz klausītājam var iespaidot apkārtējās telpas akustiskie parametri. Viens no tādiem ir reverberācija.

Nedaudz vēstures. Elektroakustikas nozares attīstības praktiskais sākums pasaulē ir saistāms ar pirmo elektroakustisko ierīču izgudrošanu. Pirmais ogles mikrofons tika izveidots 1878. gadā, to paveica Dāvids Edvards Hughs

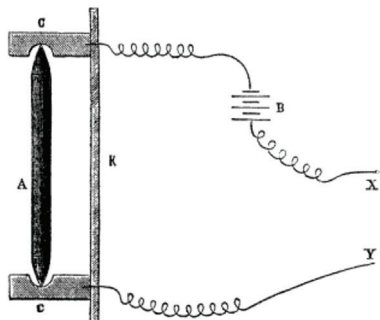
a)



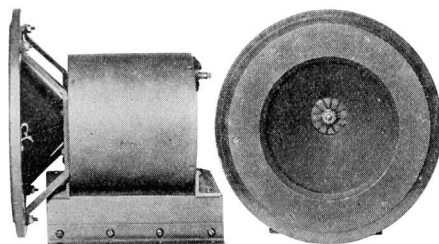
b)



2. att. Skaņas ieraksts un reproducēšana.



3. att. Ogles mikrofons.



4. att. Pirmais komerciālais skaļrunis, izgatavots firmā RCA, 1926. gadā.

(David Edward Hughes) Lielbritānijā, kā arī Emīls Berliners (*Emile Berliner*) un Tomass Edisons (*Thomas Edison*) ASV.

Skaņas viļņi iesvārstīja ogles plāksnīti A, un līdz ar to mainījās kontaktpretestība stiprinājuma vietās c, kas savukārt izraisīja ķēdē plūstošās strāvas svārstības.

Pirmo „galvas telefonu”, nosacītu skaļruņa/austiņu prototipu, 1878. gadā izveidoja Nataniels Boldvins (*Nathaniel Baldwin*) ASV un arī Ernests Merkadērs (*Ernest Mercadier*) Francijā.

Pirmais komerciālais firmas RCA skaļrunis bija aprīkots ar elektromagnētu, atšķirībā no mūsdienu ierīcēm, kurām ir pastāvīgais magnēts.

Būtisks izgudrojums ir arī fonogrāfs. Tā bija pirmā ierīce, kas ļāva ierakstīt un atskaņot skaņu, to 1877. gadā paveica Tomass Edisons (*Thomas Edison*). Tas gan vēl nebija elektrificēts, jo to darbināja akustika un mehāniska atspere, tomēr iezīmēja turpmākās attīstības virzienu.

Šī informācija ir vēsturiska, bet, kā mēs zinām, vēsturi mēdz interpretēt. Latvijā ievērojamākais notikums saistībā ar elektroakustiku ir pirmā radio-pārtraide 1923. gadā.



5. att. Tomasa Edisona (*Thomas Edison*) fonogrāfs.

Cilvēka dzirdes fizioloģija



01

- 1.1. Auss
- 1.2. Aizture
- 1.3. Dzirdē
- 1.4. Binaurālā uztvere
- 1.5. Dzirdes virziens
- 1.6. Dzirdes atmiņa
- 1.7. Skaņa un trokšņi
- 1.8. Subjektīvā uztvere un attieksme

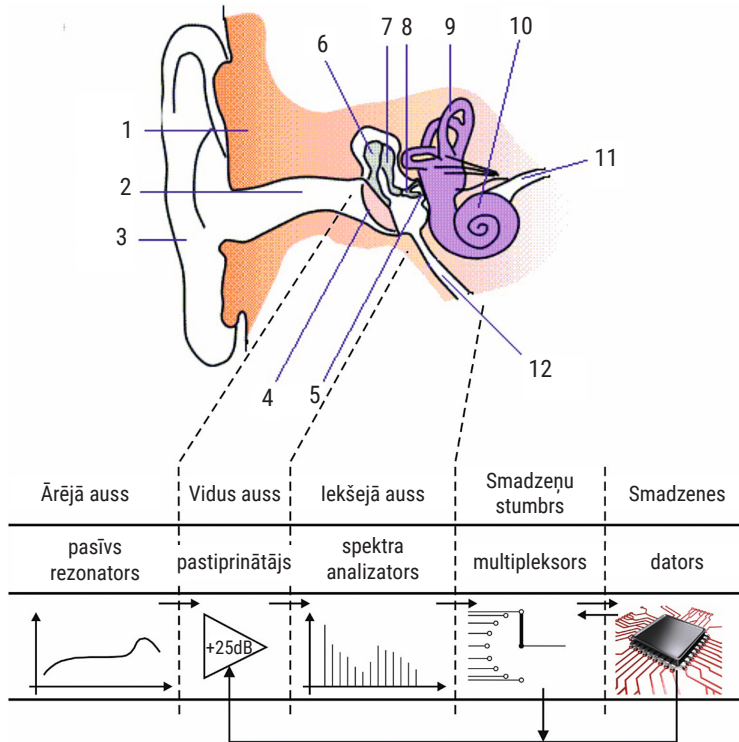


Atmiņas un prāta treniņam

1.1. AUSS

Cilvēka auss ir subjektīvs, smalks un saudzējams instruments, bez kura klātbūtnes nav iedomājama arī elektroakustika. Skaņa ir gaisa svārstības, kas nonāk ārējā auss kanālā un iesvārsta auss jutīgās sastāvdaļas. Svārstības uztver nervi un nodod ziņu – signālus – smadzenēm.

Vadības centrs – smadzenes – saņemtos signālus apstrādā, un cilvēks saprot, kādu skaņu ir dzirdējis. Jā, dzirdējis, jo no skaņas rašanās mirkļa ir pagājis laiks. Nosacīti nosauksim skaņas viļņa ceļu no auss gliemežnīcas līdz skaņas sajūtai par skaņas traktu. Kā ir uzbūvēta auss (1.1. att.)? To veido trīs daļas. Ārējā auss (2–3), vidusauss (4–8) un iekšējā auss (9–11).



1.1. att. Auss uzbūve:

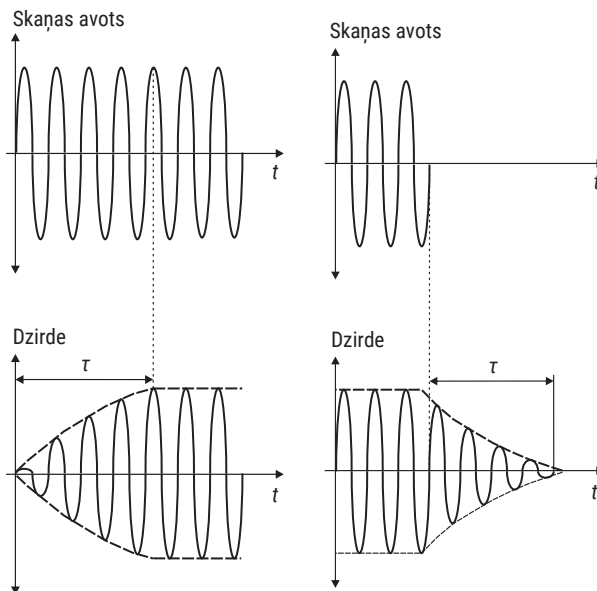
- 1 – deniņu kauls; 2 – ārējais kanāls; 3 – auss gliemežnīca; 4 – bungādiņa; 5 – ovālais lodziņš;
6 – āmuriņš; 7 – laktiņa; 8 – kāpslītis; 9 – labirints; 10 – gliemezis; 11 – dzirdes nervs;
12 – kanāls uz aizdeguni.

Skaņas vilnim nonākot ausī un iesvārstot bungādiņu, āmuriņš uztverto svārstību ritmā sit pa laktiņu. Šie ritmiskie impulsi ierosina auss nervu, un uz smadzenēm tiek pievadīti jau elektriski impulsi, radot skaņas sajūtu. Šis ir arī piemērs *pneimo-mehāniski-elektriskajam* pārveidotājam. Starp citu, iekšējā ausī atrodas arī līdzsvara orgāns.

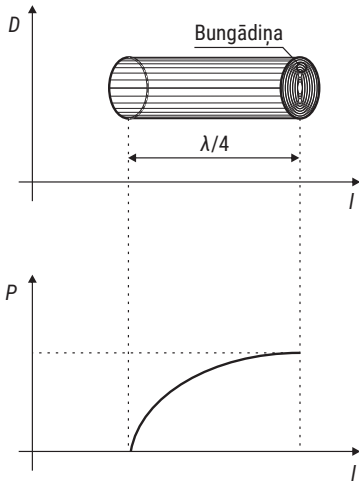
1.2. AIZTURE

Cilvēka dzirdei piemīt laika aizture – inerce τ . Telpā tā ir novērojama divos gadījumos, rodoties skaņai (*attack* – augšana) un tai izgaistot (*release* – rimšana). Paiet laiks, iekams svārstības pieaug un stabilizējas dzirdes traktā, un tāpat paiet laiks, iekams process norimst un skaņa nav dzirdama. Laika aizture tiek noteikta, mainoties skaļuma līmenim par **8–10 foniem**. Šī laika konstante praktiski nav atkarīga no toņa augstuma (frekvences) un skaļuma. Tās lielums ir ap **50 ms**. Ja dažādas skaņas pienāk ar laika nobīdi lielāku par **50 ms**, tad dzirde tās uztver kā neatkarīgas. Ja šis laika intervāls ir mazāks, tad tās summējas un veido savādāku dzirdes sajūtu.

Auss ārējais kanāls ir pielīdzināms nelielai caurulītei, kas vienā galā ir slēgta – ar bungādiņu. Šis kanāls ir līdzīgs ērģeļu stabulei. Caurulītei ir arī parametri. Tās diametrs ir apmēram **7 mm** un garums **25 mm**. Tātad tā ir **1/4 viļņa** garuma caurule ($\lambda/4$) ar tai piemītošo pārvades funkciju un rezonances īpašībām.



1.2. att. Dzirdes trakta aizture.



1.3. att. Auss ārējā kanāla ekvivalents.

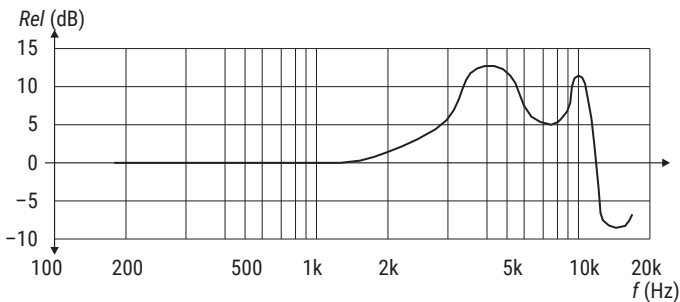
Pirmais rezonanses pīķis ir pie **3000 Hz**. Tas ir vidējo frekvenču diapazons. Šī pārvades funkcija tiek izmantota kā nemainīgs koeficients visu turpmāko no telpas ienākošo skaņu apstrādei. Šajā vidējo frekvenču diapazonā ir arī cilvēka runa. No šejienes ir arī telefonijas klausules vēsturiskais diapazons: **300–3000 Hz**. Protams, mūsdienu mobilajām sarunierīcēm šis skaņas diapazons ir daudz plašāks.

$$\lambda = c/f, \quad (1.1.)$$

kur:

c – skaņas ātrums 343 m/s, normālos apstākļos gaisā;

f – skaņas frekvence.



1.4. att. Auss ārējā kanāla pārvades funkcija (frekvenču-amplitūdas raksturliktne).

1.3. DZIRDE

Dzirde cilvēkam ļauj lokalizēt skaņas avotu un just attālumu līdz tam. Tas vienlīdz labi notiek, klausoties gan ar vienu ausi, gan abām. Skaņas avota lokalizācija sākas ārējā ausī. Skaņas tiešais vilnis ārējā kanāla sākumā kombinējas ar auss gliemežnīcā atstarotajiem viļņiem, kuriem ir dažāds telpiskais krišanas leņķis.

Tālāk šis kombinētais signāls summējas ar ārējā kanāla pārvades funkciju. Visbeidzot šo signālu apstrādā smadzenes un ļauj lokalizēt skaņas avotu. Cilvēka dzirde skaņu uztver logaritmiski.

Ar dzirdi nosakot attālumu līdz skaņas avotam, svarīgs ir toņa augstums un tā spektrs. Zemo toņu avots vienmēr šķiet tuvāks nekā augsto. Tātad ar dzirdi noteiktais attālums ir subjektīvs, teiktu, šķietams. Frekvenču diapazons, kurā

izteiktāk jūtam šo attālumu maiņu, ir līdz **500 Hz**. Līdz ar to, manipulējot ar frekvencēm, klausītājam var radīt iespaidu, ka skaņas avots pārvietojas; uzrodas un pazūd. Šī dzirdes attāluma jušanas īpatnība ir jāņem vērā, piemēram, izvietojot simfoniskā orķestra instrumentus. Kontrabasu nevajag likt orķestra priekšplānā.

1.4. BINAURĀLĀ UZTVERE

Abas ausis kopā spēj noteikt pienākošās skaņas virzienu horizontālā plaknē. Tā ir binaurālā skaņas lokācija jeb binaurālais efekts. Signāli no abām ausīm tiek apstrādāti smadzenēs, tādējādi lokalizācija notiek smadzenēs, nevis ausīs. Šai procesā svarīgi ir divi parametri: skaņas intensitāšu starpība un fāžu (skaņas pienākšanas laika) starpība starp abu ausu uztverto (1.5. att.).

Skaņa vispirms pienāk labajā ausī r_1 un tikai pēc tam kreisajā r_2 . Šos atšķirīgos pienākšanas laikus raksturo fāžu nobīde starp skaņu viļņiem $\Delta\varphi$, kas saistīta ar attālumu starpību līdz skaņas avotam $\Delta r = r_2 - r_1$.

$$\Delta\varphi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\Delta r, \quad (1.2.)$$

kur: λ – viļņa garums diapazonā 100–1000 Hz.

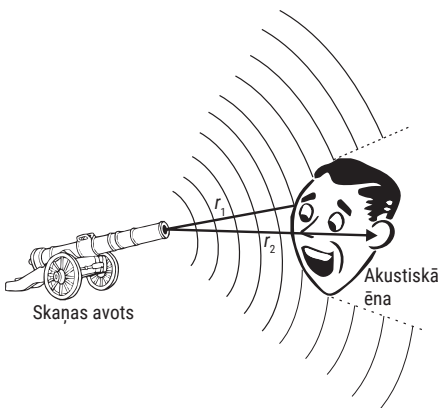
Skaņas intensitāte kreisajā ausī ir mazāka, jo tā atrodas akustiskajā ēnā. Akustiskās ēnas efekts mazinās zemo frekvenču joslā. Tas saistīts ar skaņas viļņu difrakciju. Augstāko frekvenču diapazonā akustiskā ēna kombinācijā ar fāžu nobīdes laika starpību mazina skaņas intensitāti tālākajā ausī.

Frekvenču diapazonā zem **1 kHz** būtiskāka ir fāžu nobīde. Šai frekvenču diapazonā tīra signāla gadījumā virziena noteikšanas sajūtas precizitāti θ pret fāžu nobīdi $\Delta\varphi$ raksturo šāda formula:

$$\frac{\theta}{\Delta\varphi} = \frac{1}{0,8 + 0,003f}, \quad (1.3.)$$

kur f – frekvence.

Savukārt virs **1 kHz** jūtāmāka ietekme ir signāla intensitātei. Klausītājam ir grūti noteikt skaņas rašanās vietu, ja avots ir tieši pretī vai tieši aiz muguras, jo abas ausis attiecībā uz intensitāti un fāzi ir vienādos apstākļos. Lokalizācijas precizitāte horizontālā plaknē ir **1° līdz 2°** robežās. Lokalizācija ir precīzāka, ja tonis nav tīrs, bet ir salikts, kā tas arī ir, klausoties runu vai mūziku.



1.5. att. Binaurālais efekts.

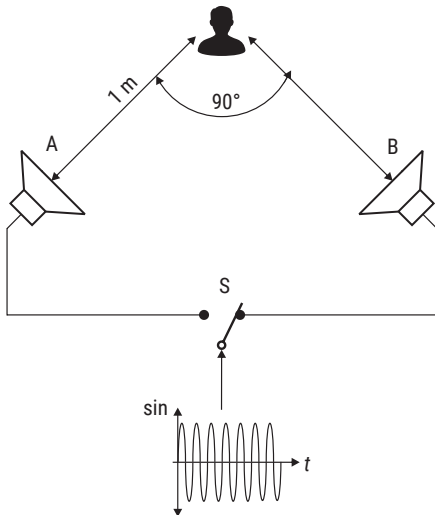
Piemēram, stereofonijas gadījumā, lai dzirdētu telpisku skaņu, klausītājam vēlams atrasties vietā, kur $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{0}$. Ievērojot šo nosacījumu, klausītājs spēj lokalizēt mūzikas instrumenta atrašanās vietu orķestrī un šī instrumenta skaļuma izmaiņas.

1.5. DZIRDES VIRZIENS

Skaņa, kuru pirmo izdzird klausītājs, rada priekšstatu par uztveres virzienu, t.i., noteic skaņas avota atrašanās vietu. Dažkārt to mēdz saukt par pirmās viļņa frontes likumu. Piemēram, nelielā telpā atrodas divi cilvēki – viens runā, bet otrs klausās. Pirmā skaņa, kuru izdzird klausītājs, ir nākusi tieši no runātāja, pie tam pa visīsāko ceļu. Šī skaņa tad arī norāda avota virzienu. Ja pēc tam pienāk šīs pirmās skaņas viļņa visdažādākie atstarojumi, noteiktais uztveres virziens saglabājas. Virziena noteikšana notiek laikā, kas ir mazāks par **1 ms**.

1.6. DZIRDES ATMIŅA

Lai arī auss, sadarbojoties ar atmiņu, spēj noteikt skaņas avota virzienu, reizēm tomēr notiek kļūmes. To demonstrē Fransena (*Franssen*) efekts (1.6. att.), kas parāda dzirdes atmiņas lomu, nosakot skaņas avota virzienu.



1.6. att. Fransena (*Franssen*) efekta demonstrācija.

Klausītājam simetriski abās pusēs ir novietoti skaļruņi, apmēram **1 m** attālumā un **45°** leņķī pret garenasi. Sākumā sinusoidālu signālu atskaņo skaļrunis B, tad pēc laika sprīža notiek ātra komutācija, un skanēt turpina skaļrunis A. Signāla līmenis abos skaļruņos to skanēšanas laikā ir identisks. Liela daļa klausītāju arī pēc komutācijas turpina klausīties skaļruni B. Šis demonstrējums ilustrē dzirdes atmiņas lomu skaņas avota identifikācijā.

Lai gan ir pieņemts, runājot par skaņu saistībā ar dzirdi, aptvert diapazonu no **20 Hz** līdz **20 000 Hz**, cilvēka dabiskās novecošanas procesā dzirdes diapazons sašaurinās, it īpaši jutība pazeminās diapazona augsto frekvenču galā.

1.7. SKAŅA UN TROKŠŅI

Akustika ir mācība par skaņu, tā prof. K. Tomariņš rakstīja savā grāmatā “Radio elektroakustika”. Turpmākajā izklāstā aplūkosim skaņu un trokšņus raksturojošos lielumus un procesus, kas ļaus labāk izprast šīs fizikālās parādības un ar tām sadarboties, kā arī kontrolēt trokšņus, kas bieži vien ir tik nevēlami cilvēka veselībai un komfortam.

Daudzas definīcijas un apzīmējumi ir starptautiski standartizēti un sako poti standartu publikācijās. Piemēram, **IEC 60050-801** (1994).

Trokšni var definēt kā *nepatikamu vai nevēlamu skaņu* vai kā kādu citu traucējumu. No akustikas viedokļa skaņu un trokšni raksturo viena un tā pati atmosfēras spiediena parādība, proti, svārstības ap kādu vidējo atmosfēras spiediena punktu. Tātad iedalījums skaņa/trokšnis ir tīri subjektīvs. Kas vienam liksies skaņa, kādam citam tas var šķist trokšnis.

Mūsdienu industriālajā pasaulē trokšņu avotu skaits ir būtiski pieaudzis salīdzinājumā ar pirms elektroakustikas laikmetu. Līdz ar to ir pieaudzis arī trokšņu apdraudējums dzirdei. Kaut arī elektroniski pastiprināta mūzika tiek uzskatīta par skaņu (ne trokšni) un daudziem sniedz estētisku un māksliniecisku baudījumu, pārmērīgs trokšnis nav tīkams nevienam. Bet viņu čala un meža šalkoņa arī ir trokšnis.

1.8. SUBJEKTĪVĀ UZTVERE UN ATTIEKSME

Skaņu var uzskatīt par dzirdes mehānisma ierosinātāju, kā rezultātā notiek skaņas uztvere. Te parādās skaņas nosacītā duālā daba. Šis duālisms ir pazīstams tiem, kuri interesējas par skaņu un mūziku. Ja mūs interesē gaisa plūsmas telpā fizikālie aspekti, tad tas ir fiziķu problēmu lauks. Ja interesējamies par to, kā šīs gaisa plūsmas telpā uztver klausītājs, tad te pētniecībai ir lietojamas psihoakustikas metodes.

Par cik *akustiska* un vēlāk arī *elektroakustiska* tiek aplūkotas saistībā ar cilvēku, ir jāņem vērā abi aspekti. Skaņa ir objektīva parādība. Piemēram, skaņu raksturo frekvence (tonis), kas satur atkārtotu viļņveida svārstību skaitu laika vienībā – parasti **1 sekunde**. To var novērot ar osciloskopu un izmērīt ar frekvenčmēru. Tikpat labi skaņu var vērtēt arī subjektīvi. Piemēram, toņa augstums ir skaņas subjektīvais raksturlielums.

Auss uztver atšķirīgus toņa augstumus klusam un skaļam tonim pie vienas un tās pašas frekvences. Tāpat dualitāte pastāv starp skaņas intensitāti un skaļumu, starp skaņas spektru un tembru. Mijiedarbība starp skaņas fizikālajām parādībām un mūsu uztveri (dzirdi) rada gana sarežģītas problēmas.

Elektroakustisko ierīču, koncertzāļu projektēšana ir mērķtiecīgs un objektīvs inženierprocess, bet praktiskais – objektīvais – rezultāts tiek vērtēts subjektīvi. Ir atziņa, ka skaļruņi netiek konstruēti tālab, lai atskaņotu tīru **sin**

signālu kalibrētam mikrofonam akustiskajā kamerā. To uzdevums ir atskaņot mūziku vai balsi telpā. Citiem vārdiem sakot, akustikas un elektroakustikas studijas ir saistītas gan ar mākslu, gan ar zinātni.

Sāksim ar zinātni, bet atcerēsimies, ka auss noteiks mūsu projektu veiksmes un kļūdas.



ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅĀM

1. Kāds ir vispārpieņemtais audio diapazons?
2. Kāda bija pirmā komerciālā skaļruņa īpatnība salīdzinājumā ar mūsdienu ierīcēm?
3. Kur cilvēkam rodas skaņas sajūta?
4. Cik liela ir cilvēka dzirdes aizture?
5. Kam līdzinās auss ārējais kanāls?
6. Cilvēka dzirde skaņu uztver lineāri vai logaritmiski?
7. Kas ir binaurālais efekts?
8. Ko noteic pirmā viļņa frontes likums?
9. Ar kādu eksperimentu var demonstrēt cilvēka dzirdes atmiņu?
10. Kā mainās cilvēka dzirdes diapazons normālā novecošanas procesā?
11. Kā var raksturot skaņu un troksni?
12. Kāda ir elektroakustikas saistība ar zinātni un mākslu?

SKAŅAS FIZIKĀLIE PARAMETRI



02

- 2.1. Viļņu ģenerācija. Atsperes svārstis, harmoniskas sinusoidālas svārstības, virzulis
- 2.2. Akustiskais lauks. Skaņa vidē, daļiņu kustība un to pārvietošanās ātrums, viļņu formas, viļņu pretestība
- 2.3. Skaņas intensitāte. Skaņas izplatīšanās, skaņas ātrums, viļņa garums un frekvence, vispārējie frekvenču diapazoni un to lietojums
- 2.4. Audiofrekvenču diapazons
- 2.5. Saliktas svārstības. Harmonikas, fāze, oktāvas, mērījumu joslas, spektrs, troksnis
- 2.6. Skaņas līmeņa mērījumi. Sinusoidāla signāla mērījumi
- 2.7. Skaļuma līmenis. Skaļums, skaļums un joslas platums, tembrs, runa, skaņas augstums un intervāli, toņa vai skaņas forma, muzikālā skala



Atmiņas un prāta treniņam

2.1. VIĻŅU ĢENERĀCIJA. ATSPERES SVĀRSTS, HARMONISKAS SINUSOIDĀLAS SVĀRSTĪBAS, VIRZULIS

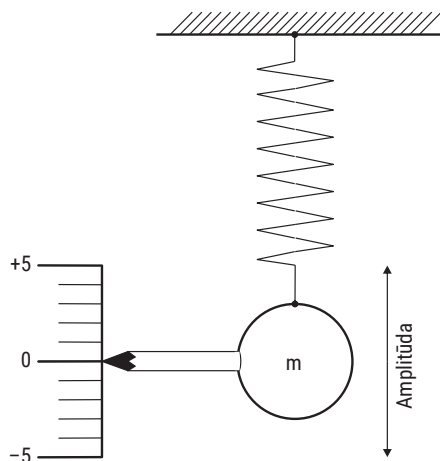
Viļņu ģenerācija. Gan skaņa, gan troksnis ir spiediena izmaiņu rezultāts vai svārstības homogēnā, elastīgā vidē (gaiss, ūdens, cieta viela), kuras izraisa vibrējoša (svārstīga) virsma vai turbulenta gaisa plūsma. Skaņa izplatās garenviļņu (longitudinālu viļņu) formā. Šeit vides daļiņu svārstību virziens sakrīt ar viļņa kustības virzienu (mezglu un blīzuma punkti). Tādi ir skaņas spiediena viļņi, zemestrīces P viļņi. Kā piemērs ir minami pūšamie instrumenti. Pretstats ir šķērsviļņi (transversālie viļņi), kuros daļiņu svārstību virziens ir perpendikulārs viļņa izplatības virzienam. Šāda viļņu forma piemīt stīgu instrumentiem, gaismai, zemestrīces S viļņiem. Okeāna viļņos ir gan garenviļņi, gan šķērsviļņi. Turpmāk aplūkosim tikai garenviļņus un to izplatību gaisā.

Atsperes svārstis. Atspērē iekārtas atsvārstis ir svārstību sistēma (2.1. att.), kas ģenerē vienkāršas, harmoniskas, rimstošas svārstības. Ja atsvārstis ir nekustīgs, tad sistēma ir līdzsvarā.

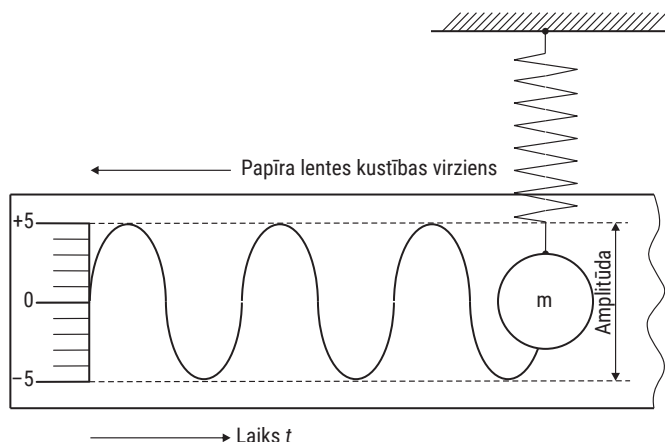
Ja atsvārstis novelkam lejā līdz atzīmei -5 un tad atbrīvojam, tas pārvietojas augšup uz sākumstāvokli, taču tur neapstājas. Inerciāli tas turpina kustību gandrīz līdz atzīmei $+5$. Atsvārstis pārvietojums no punkta -5 līdz punktam $+5$ ir svārstību amplitūda. Atsvārstis turpina svārstīties. Katrs pārvietojums augšā/lejā tiek saukts par svārstību ciklu un šo kustību sauc par periodisku (tā atkārtojas). Svārstības nodrošina atsvārstis masas inerces un atsperes elastīgums. Inerces un elastīgums ir tie parametri, kas nepieciešami videi, lai pārraidītu (vadītu) skaņu. Šai svārstību sistēmā svārstības ir rimstošas, jo ir berzes zudumi gan atspērē, gan gaisā.

Harmoniskas, sinusoidālas svārstības. Harmoniska kustība ir svārstību (oscilāciju) pamatveids. Tās viļņa forma ir pamats skaņas un elektronikas pētījumos. Ja atsvārstis piestiprina zīmuli un blakus novieto ar nemainīgu ātrumu slidošu papīra lenti, tad, iesvārstot sistēmu, uz papīra iegūtā līkne attēlo sinusoidālas svārstības (2.2. att.).

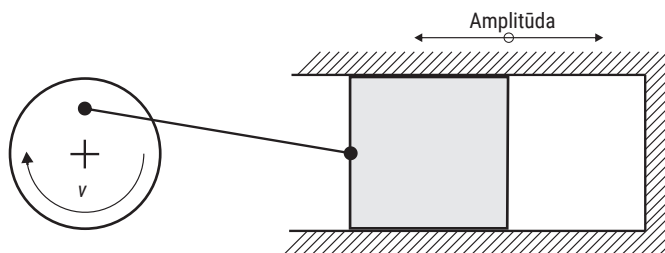
Šī līkne ir tiešs harmonisku svārstību attēlojums. Ja pieņemam, ka šai sistēmā nav zudumu, tad svārstības periodiski atkārtosies un cikliski tiks zīmēta sinusoidāla līkne. Ja uz šo



2.1. att. Svārstību sistēma.



2.2. att. Sinusoidālu svārstību līkne.



2.3. att. Virzuļa kustība dzinējā.

svārstību sistēmu neiedarbojas citi ārēji spēki, tad ir tikai un vienīgi sinusoidālās svārstības. Svārstību amplitūda ir laikā mainīgs lielums.

Virzulis. Cits harmonisku svārstību piemērs ir automobiļa dzinēja virzuļa un kloķvārpstas mijiedarbība. Te novērojama mijiedarbība starp rotācijas kustību un lineāru harmonisku kustību (2.3. att). Salīdzinot šo piemēru ar iepriekšējo, virzuļa kustības projekcija laikā arī attēlo sinusoidālas svārstības.

2.2. AKUSTISKAIS LAUKS. SKAŅA VIDĒ, DAĻIŅU KUSTĪBA UN TO PĀRVIETOŠANĀS ĀTRUMS, VIĻŅU FORMAS, VIĻŅU PRETESTĪBA

Akustiskais lauks. Visos nozīmīgākajos akustiskajos procesos skaņa izplatās ar garenviļņu starpniecību. Turpmāk aplūkosim tikai šos viļņus. Telpas daļu, kurā pastāv skaņas viļņi, sauc par akustisko lauku. Garenviļņus akustiskajā laukā gana pietiekami raksturo divi mainīgi lielumi – skaņas spiediens un svārstīšanās ātrums. Abi lielumi ir laika un telpas koordinātu funkcijas.

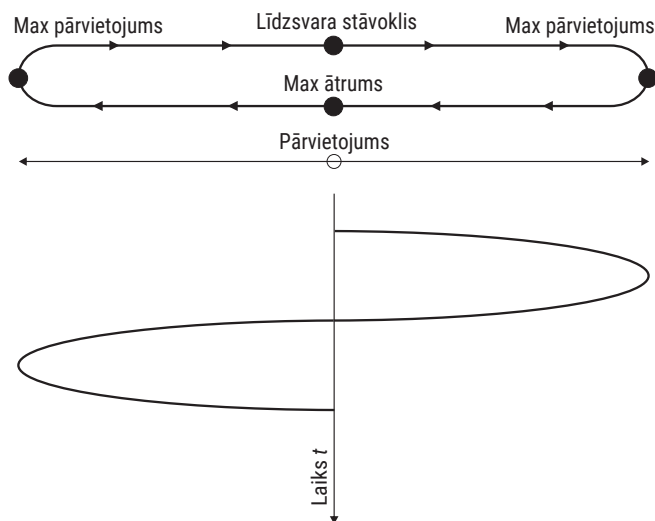
Skaņa vidē. Iepriekšējais piemērs ar atsvaru un atsperi modelē gaisa molekulu kustību. Ja gaisa daļiņas ir izkustinātas no to pamatstāvokļa, tad tās gaisa elastības spēku ietekmē cenšas atgriezties iepriekšējā pozīcijā. Arī gaisa daļiņām ir inerce, tāpēc tās neatgriežas sākotnējā pozīcijā, bet *aizskrien* garām uz pretējo pusi, tad atkal atpakaļ un tā turpina. Vides elastība ir būtisks nosacījums, kas ļauj pastāvēt (izplatīties) skaņas viļņiem. Skaņas viļņi spēj izplatīties gāzēs, šķidrumos un cietās vielās. Tas var būt gaiss, ūdens, metāls, betons. Atšķirīgs ir tikai skaņas izplatīšanās ātrums.

Piemēram, jūs atrodaties pie sliežu klātnes, kas novietota uz cietas klints pamatnes. Ja tuvojas vilciens, tad jūs izdzirdēsiet divas skaņas. Pirmā atnāks pa sliedēm un pēc tam pa gaisu. Jo sliežu materiāls ir blīvāks salīdzinājumā ar gaisu. Līdzīgi skaņas zem ūdens var pienākt ar lielu aizturi.

Ja vidi neaizpilda kāda viela – skaņa nevar izplatīties. Piemēram, ievieto zvanu slēgtā stikla traukā, pildītā ar gaisu. Pakāpeniski atsūknējot gaisu, dzirdamība mazinās, līdz visbeidzot zvanu nedzirdam.

Daļiņu kustība un to pārvietošanās ātrums. Vēja radītie viļņi izplatās pa labības lauku, bet stieбри paliek uz vietas, svārstoties ap sakni. Līdzīgi ir arī ar gaisa daļiņām. Tās nepārvietojas bezgalīgi tālu no līdzsvara punkta (2.4. att.).

Skaņas vilnis izplatās, bet daļiņas pārvietojas ierobežotā apgabalā. Tā dimensijas ir mērāmas milimetra daļās. Daļiņas sasniedz savu maksimālo ātrumu, ejot caur līdzsvara punktu. Savukārt ātrums līdzvērtīgs nullei ir maksimuma punktos. Tāpat kā svārsta gadījumā. Maksimālais ātrums tiek saukts par ātruma amplitūdu un maksimālais pārvietojums par pārvietojuma amplitūdu. Daļiņu maksimālais ātrums ir ļoti neliels, mazāks par **10 mm/s** pat skaļai skaņai. Tātad, lai pazeminātu skaņas līmeni, ir jāsamazina daļiņu ātrums



2.4. att. Gaisa daļiņu kustība svārstību viļņī.

(picikato – cik stipri atvelk stīgu mūzikas instrumentā). Kustības ātrumam, tāpat kā spiedienam, var noteikt amplitūdu, momentāno un efektīvo vērtību. Mērvienība ir **m/s**.

Sinusoidāla signāla gadījumā par pozitīvo pusperiodu pieņemts saukt to, kura laikā elementārdaļiņas pārvietojas skaņas izplatīšanās virzienā, savukārt par negatīvo pieņemts saukt to, kura laikā elementārdaļiņas pārvietojas pretēji skaņas izplatīšanās virzienam. Skaņas spiediena un svārstīšanās ātruma momentānās vērtības saista sakarība:

$$V_{\text{mom}} = j \frac{1}{\omega \rho} \cdot \frac{\partial p_{\text{mom}}}{\partial x}, \quad (2.1.)$$

kur: $\omega = 2\pi f$;

f – svārstību frekvence, Hz;

x – attāluma koordināte skaņas izplatīšanās virzienā;

$j = \sqrt{-1}$ – simbols 90° lielai fāzes nobīdei;

ρ – vides blīvums.

Parciālo atvasinājumu ($\partial p_{\text{mom}}/\partial x$) sauc par spiediena gradientu.

Svārstīšanās ātrums un spiediena gradients ir savstarpēji proporcionāli un bieži vien šos jēdzienus lieto ar vienādu nozīmi.

Plakana viļņa spiediena gradienta modulis ir:

$$|\text{grad}p| = \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right|,$$

kur: x – attālums.

Sfēriska viļņa spiediena gradienta modulis ir:

$$|\text{grad}p| = \left| \frac{\partial p}{\partial r} \right|,$$

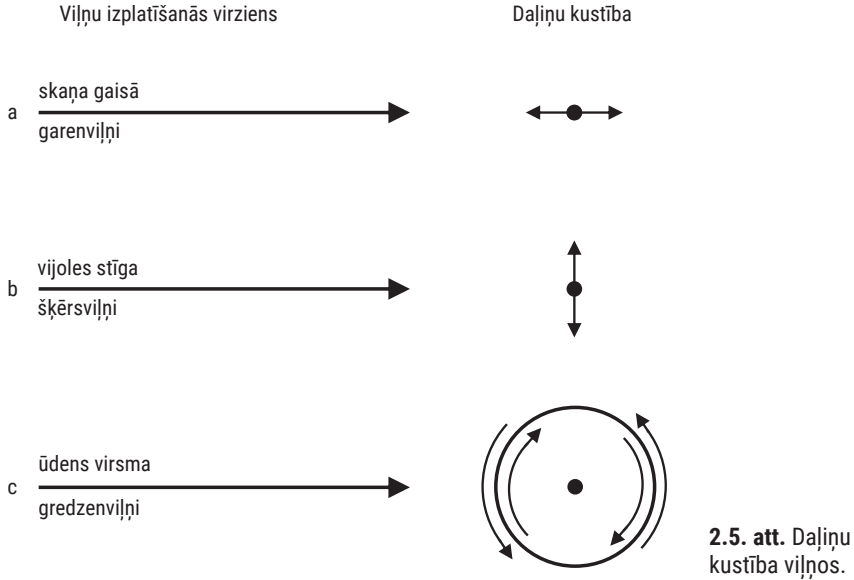
kur: r – rādiuss.

Piemēram, mikrofonus, kuru elektriskais signāls ir proporcionāls svārstīšanās ātrumam, sauc par spiediena gradienta mikrofoniem (ātruma mikrofoniem). Šo mikrofonu jutība nav atkarīga no frekvences.

Viļņu forma. Ir trīs atšķirīgas daļiņu kustības formas. Gāzu vidē (piemēram, gaisā, pūšaminstrumentā), daļiņas kustas viļņa pārvietošanās virzienā. Tādus viļņus sauc par garenviļņiem (longitudeniālie) (2.5. att a).

Otro viļņu formu raksturo vijoles stīgas svārstības. Stīga (tās daļiņas) svārstās perpendikulāri skaņas viļņa izplatīšanās virzienam. Tie ir šķērsviļņi (transversālie) (2.5. att. b).

Trešo viļņu formu ilustrēsim ar šādu piemēru. Vertikāli iemetam akmeni stāvošā ūdenī. Koncentriski viļņi sāk izplatīties no punkta, kur akmens saskārās ar ūdens virsmu. Savukārt ūdens daļiņas dziļākos slāņos kustēsies pa grezdenveida orbītu (2.5. att. c).



2.5. att. Daļiņu kustība viļņos.

Plakans vilnis. Plakanā vilnī (2.6. att.) skaņas spiediena vienādās fāzes atrodas vienā plaknē. Skaņas momentāno spiediena vērtību izteic vienādojums:

$$P(t, r) = P_{\max} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r\right), \quad (2.2.)$$

kur: $\omega = 2\pi f$;

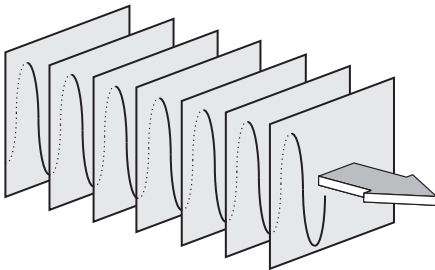
t – laiks;

λ – viļņa garums;

r – attālums.

Plakans vilnis ir raksturīgs ar to, ka tā spiediens nav atkarīgs no attāluma jeb r koordinātes. Plakanā vilnī skaņas enerģija pārvietojas, bet neizkliedz.

Sfēriskais vilnis. Lielos attālumos no skaņas avota viļņu frontes forma tuvojas sfēriskai. Sfēriskā vilnī skaņas spiediena vienādās fāzes veido sfēru ar rādiusu r . Rādiusa sākumpunkts tiek saukts par starojuma centru. Sfēriskā vilnī skaņas enerģija izkļiedžas. Skaņas intensitāte samazinās apgriesti proporcionāli attāluma kvadrātam:



2.6. att. Plakans vilnis.

$$P(t, r) = \frac{P_1}{r} \exp\left(j\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r\right)\right), \quad (2.3.)$$

kur: $\omega = 2\pi f$;

t – laiks;

λ – viļņa garums;

r – attālums;

P_1 – skaņas spiediena amplitūda 1 m attālumā no centra.

$$I = \frac{P_1}{r^2 2\rho v}, \quad (2.4.)$$

kur: ρ – vides blīvums;

v – skaņas ātrums.

Viļņu pretestība. Par viļņu pretestību jeb vides īpatnējo pretestību Z_s sauc attiecību starp skaņas spiedienu un svārstīšanās ātrumu:

$$Z_s = \frac{P}{v}. \quad (2.5.)$$

Plakanā vilnī, ja rimšanas dekrementa nav liels, Z_s ir reāls lielums un ir atkarīgs tikai no vides fizikālajām īpašībām. Gaisā pie normāla spiediena izteiksme ir šāda:

$$Z_{s_{\text{plak}}} = \rho v, \quad (2.6.)$$

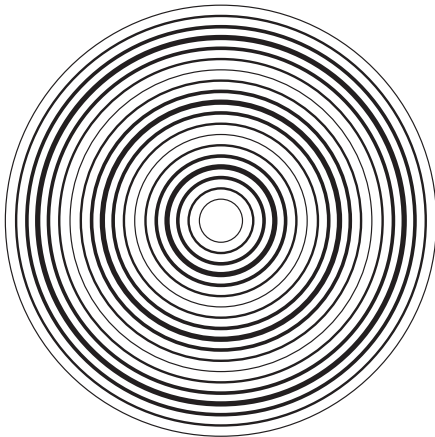
kur: $\rho = 1,21 \text{ kg/m}^3$;

$v = 343 \text{ m/s}$.

Sfēriskā vilnī Z_s ir kompleksa lielums:

$$Z_{s_{\text{sfer}}} = \rho v(r' + jx'). \quad (2.7.)$$

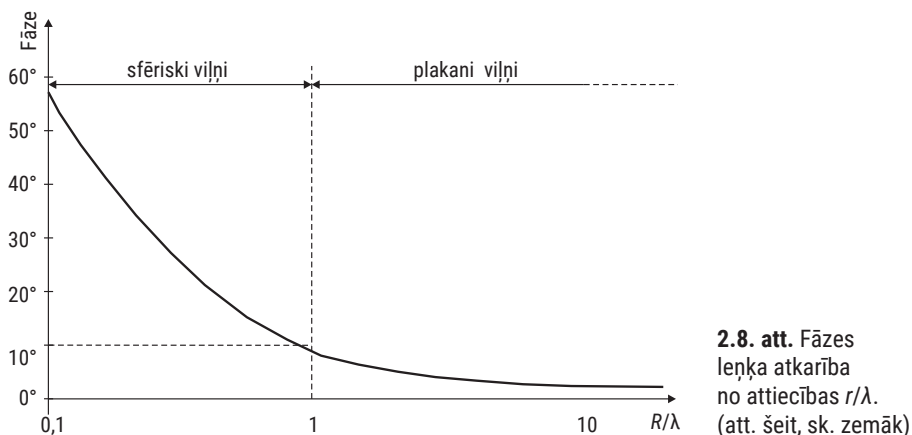
Lielumi $(r' + jx')$ ir bezdimensiju koeficienti, kas nosaka kompleksā skaitļa $Z_{s_{\text{sfer}}}$ reālās un imaginārās daļas saturu. Abi koeficienti ir atkarīgi no frekvences un attāluma.



2.7. att. Sfērisks vilnis.

Kompleksa viļņu pretestība norāda uz fāzes nobīdi starp skaņas spiedienu un svārstīšanās ātrumu sfēriskā vilnī. Sakarības starp fāzes leņķi, viļņa garumu un attāluma rādiusu R parādītas 2.8. att.

Šis grafiks ir uzskatāms vai nu par fāzes nobīdes frekvenču līkni noteiktā attālumā r , vai arī par fāzes nobīdes atkarību no attāluma R pie noteiktas frekvences, respektīvi, noteikta viļņa garuma λ . Ja attālums no starojuma centra līdz vietai, kur nosaka fāzes nobīdes leņķi, ir lielāks nekā viļņa garums, t.i., $R > \lambda$, tad fāzes



nobīde ir samērā neliela, $<9^\circ$, un skaņas vilnis uzskatāms par plakānu. Tātad attālums $R = \lambda$, kas nosaka robežu starp plakāniem un sfēriskiem viļņiem, ir atkarīgs no frekvences.

Zemu frekvenču gadījumā tas var būt samērā liels, piemēram, ja $f = 100 \text{ Hz}$, $\lambda = 3,43 \text{ m}$. Ja veicot apskaņošanu vai studijas ierakstu, attālums no mikroфона līdz skaņas avotam ir mazāks nekā viļņa garums, dažu tipu mikrofoniem nelabvēlīgi izmainās frekvenču likne – parādās t.s. tuvās zonas efekts. Šinī gadījumā tiek minimizēts telpas vides iespaids. Mikrofoniem ar apļa darbības diagrammu tas nav izteiktas.

Jo izteiktāka ir mikroфона virziendarbības diagramma, jo izteiktāks ir šis efekts frekvenču joslā zem 1 kHz .

2.3. SKAŅAS INTENSITĀTE. SKAŅAS IZPLATĪŠANĀS, SKAŅAS ĀTRUMS, VIĻŅA GARUMS UN FREKVENCE, VISPĀRĒJIE FREKVENČU DIAPAZONI UN TO LIETOJUMS

Skaņas intensitāte. Intensitāte ir enerģijas plūsma caur laukuma vienību. Skaņas viļņiem izplatoties, tie pārnes enerģiju. Skrejošā skaņas vilnī enerģijas plūsmu raksturo Pointinga vektors:

$$U = p_{\text{nom}} \cdot v_{\text{nom}}, \quad (2.8.)$$

kur: p_{nom} – skaņas spiediena momentānā vērtība;
 v_{nom} – svārstīšanās ātruma momentānā vērtība.

Pointinga vektors, tāpat kā p_{nom} un v_{nom} , ir laika funkcija. Tā kā cilvēka dzirde nespēj izsekot atsevišķām skaņas viļņa fāzēm, praktiski lielāka nozīme ir p_{nom} un v_{nom} reizinājuma vidējai integrālai vērtībai noteiktā laika posmā:

$$I = \frac{1}{T} \int_D^T p_{\text{nom}} \cdot v_{\text{nom}} \cdot dt. \quad (2.9.)$$

Vidējo enerģijas plūsmu I sauc par skaņas intensitāti. Integrēšanas laikam T periodisku svārstību gadījumā ir jābūt vienādam ar veselu skaitu periodu.

Veicot praktiskus mērījumus, skaņas intensitāti ir izdevīgāk noteikt, mērot skaņas spiedienu, to var veikt ar vienkāršiem tehniskiem līdzekļiem, piemēram, ar spiediena mikrofonu. Turklāt šai gadījumā nav nepieciešams veikt fāzes nobīdes leņķa mērījumus. Skaņas intensitāti var izteikt arī ar spiediena efektīvo vērtību:

$$I = \frac{P_{ef}^2}{\rho c_0}, \quad (2.10.)$$

kur c_0 – skaņas ātrums;

ρ – vides blīvums.

Šo izteiksmi var izmantot ne tikai sinusoidāla signāla gadījumā, bet arī jebkura cita stacionāra procesa gadījumā.

Brīvā laukā skaņas intensitātes izteiksme ir:

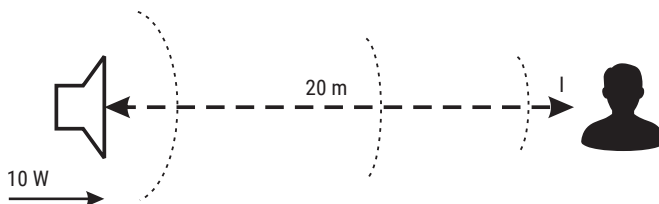
$$I = \frac{P}{4\pi r^2}, \quad (2.11.)$$

kur: P – jauda;

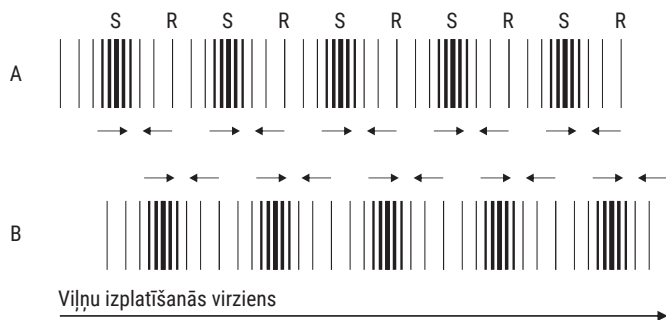
r – attālums (rādiuss).

Skaņas izplatīšanās. Pateicoties gaisa daļiņu turp/atpakaļ svārstībām (tās ierosina skaļruņa difuzora turp/atpakaļ kustība), skaņa (mūzika) no skaļruņa spēj sasniegt mūsu ausis (2.9. att.).

2.10. attēlā dažāda biezuma līnijas attēlo dažāda blīvuma apgabalus, aizpildītus ar gaisa molekulām. Dabā molekulu skaits nelielā tilpuma vienībā (cm^3) ir ļoti liels – miljonus. Gaisa apgabali, kuri attēloti ar biezākām līnijām (bultas tiecas cita uz citu) ir spiediena apgabali. Šeit spiediens ir lielāks par apkārtējās atmosfēras vidējo spiedienu (Hg stabiņa augstums virs jūras līmeņa). Savukārt gaisa



2.9. att. Skaņas intensitāte.



Viļņu izplatīšanās virziens

S – spiediena apgabals
R – retinājuma apgabals

2.10. att. Skaņas izplatīšanās:

apgabali, kuri attēloti ar tievākām līnijām (bultas tiecas prom cita no citas) ir retinājuma apgabali, kuros spiediens ir zemāks par vidējo atmosfēras spiedienu.

Spiediena apgabali un retinājuma apgabali ir nobīdīti attiecībā pret bultām – attiecīgi pa labi un pa kreisi, jo vilnis izplatās. Katra atsevišķā gaisa molekula pēc sākotnējās pārvietošanās centīsies atgriezties sākumstāvoklī. Tas saistīts ar masas elastību. Tā pārvietosies noteiktu distanci pa labi un tad tikpat lielu pa kreisi no nekustīgā punkta, ja skaņas vilnis vienmērīgi izplatās pa labi. Skaņa eksistē, pateicoties daļiņu kustības savstarpējai apmaiņai. Katra daļiņa nodod kustību nākošajai.

Kāpēc šajā piemērā skaņas vilnis izplatās pa labi? To var noskaidrot un izprast, rūpīgāk aplūkojot bultas. Molekulas tiek sablīvētas apgabalā, kur bultas tiecas viena uz otru, un tas notiek nedaudz pa labi no spiediena apgabala virsotnes. Tur, kur bultas tiecas viena no otras prom, molekulu blīvums samazinās. Tādējādi kustība no spiediena virsotnes uz retinājuma virsotni nodrošina viļņa izplatību pa labi. Kā jau apskatījām, tad spiediens spiediena apgabalā un retinājuma apgabalā ir attiecīgi augstāks un zemāks par vidējo atmosfēras spiedienu (2.11. att.).

Patiesībā šīs skaņas izraisītā spiediena svārstības ap atmosfēras spiedienu ir niecīgas. Visklusākā skaņa, kuru var uztvert cilvēka auss ($20 \mu\text{Pa} = 0,000020 \text{ Pa} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$), eksistē pie spiediena, kas ir $5 \cdot 10^6$ reizes mazāks par atmosfēras spiedienu.

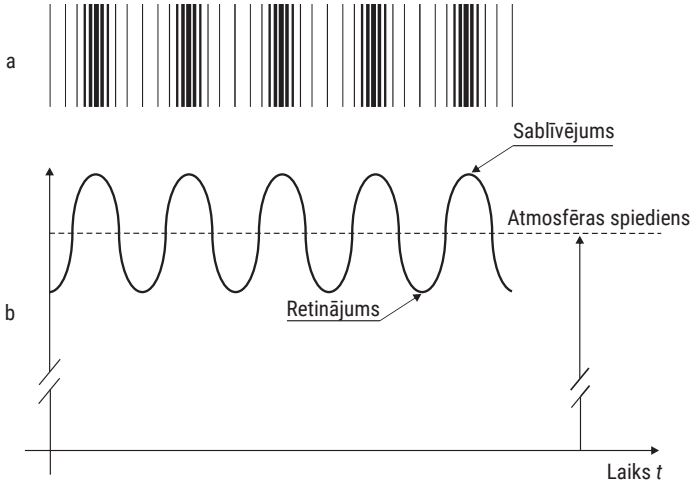
Normāla runas un mūzikas skaņa izraisa vien nelielas atmosfēras spiediena svārstības. Tā uzklājas atmosfēras spiedienam.

Skaņas ātrums. Skaņas ātrums c sausā gaisā pie $20 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūras ir apmēram 343 m/s (1234 km/h).

Ja vides temperatūra nav pārlietu atšķirīga no $20 \text{ }^\circ\text{C}$, tad skaņas ātrumu var noteikt pēc šādas formulas:

$$c = 332 + 0,6 \cdot T_c, \quad (2.12.)$$

kur T_c – vides temperatūra, $^\circ\text{C}$.



2.11. att.
Atmosfēras vidējais
spiediens un skaņa.

Ar nākamās formulas palīdzību ir iespējams noteikt ātrumu jebkurā gāzē pie jebkuras temperatūras:

$$C = \sqrt{\frac{YRT}{M}}, \quad (2.13.)$$

kur Y – adiobātiskais indekss, diapazonā no 1,399 līdz 1,403;

R – universālā gāzes konstante $8,314 \text{ (J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$;

T – absolūtā temperatūra;

M – gāzes molekulmasa.

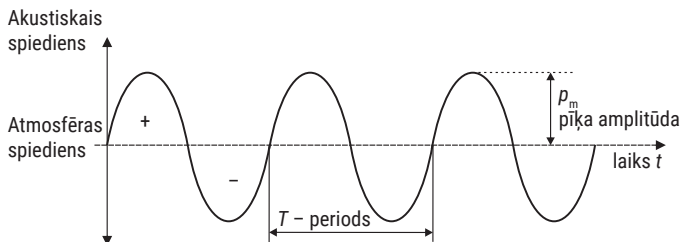
Tātad turpmākajā tekstā skaņas ātruma lielums normālos apstākļos gaisā ir:

$$c_0 = 343 \text{ m/s.}$$

Aerodinamikā to sauc par lielumu **Mach 1.0** (Maha skaitlis). Ar to mēra un raksturo lidobjekta ātrumu attiecībā pret skaņas ātrumu konkrētajā vidē. Skaņas ātrums, kas ir lielāks par *Mach 1.0*, tiek saukts par virsskaņu. Skaitlis norāda relatīvo attiecību starp objekta ātrumu un skaņas ātrumu.

Spiediens ir nesvarīgs faktors, raksturojot skaņas ātrumu. Tas nav jāsaista ar jēdzienu *virš jūras līmeņa*. Skaņas ātrumu nosaka vides temperatūra. Tas nav atkarīgs arī no amplitūdas, frekvences vai viļņu garuma.

Praktisks piemērs zināšanu lietojumam. Negaisa laikā redzot zibens uzliesmojumu, jāsāk skaitīt sekundes, līdz izdzird pērkona grāvienu. Sekundes pareizinot ar **343 m/s**, iegūstam attālumu līdz zibens spēriena vietai. Gaismas ātrums īpaši neietekmēs mērījuma precizitāti, jo tas ir **299 792 458 m/s**.



2.12. att.
Sinusoidālas
svārstības un to
parametri.

Skaņas ātrums dažādās vidēs ir atšķirīgs. Jo blīvāka vide, jo ātrums ir lielāks. Blīvākā vidē molekulu attālums ir mazāks un ir iespējams ātrāk pārvadīt skaņas enerģiju. Gaisa temperatūra un mitrums iespaido skaņas izplatīšanās ātrumu. Šiem parametriem pieaugot, ātrums palielinās.

Ir jāatceras, ka skaņas izplatīšanās ātrums nav tas pats, kas gaisa daļiņu kustības ātrums. Skaņas ātrums nosaka, cik ātri skaņas enerģija izplatās vidē. Savukārt daļiņu ātrums noteic skaņas skaļumu.

Viļņa garums un frekvence. Izprast sinusoidālu (tīra toņa) svārstību raksturlielumus palīdzēs 2.12. attēls

Viļņa garums λ ir attālums (pārvietojums), kuru veic punkts, pārvietojoties pa līkni viena cikla garumā. Periods T savukārt ir attālums starp diviem (fiksētiem) tuvākajiem punktiem, kuri atrodas uz līknes identiskās vietās, un to mēra sekundēs. Šīs definīcijas ir piemērojamas arī nesinusoidālām svārstībām.

Svārstību frekvenci f nosaka ciklu skaits sekundē. To mēra hercos (Hz). Troksni raksturo daudzu frekvenču kombinācijas vienlaikus.

Minētos lielumus un skaņas ātrumu saista šādas sakarības:

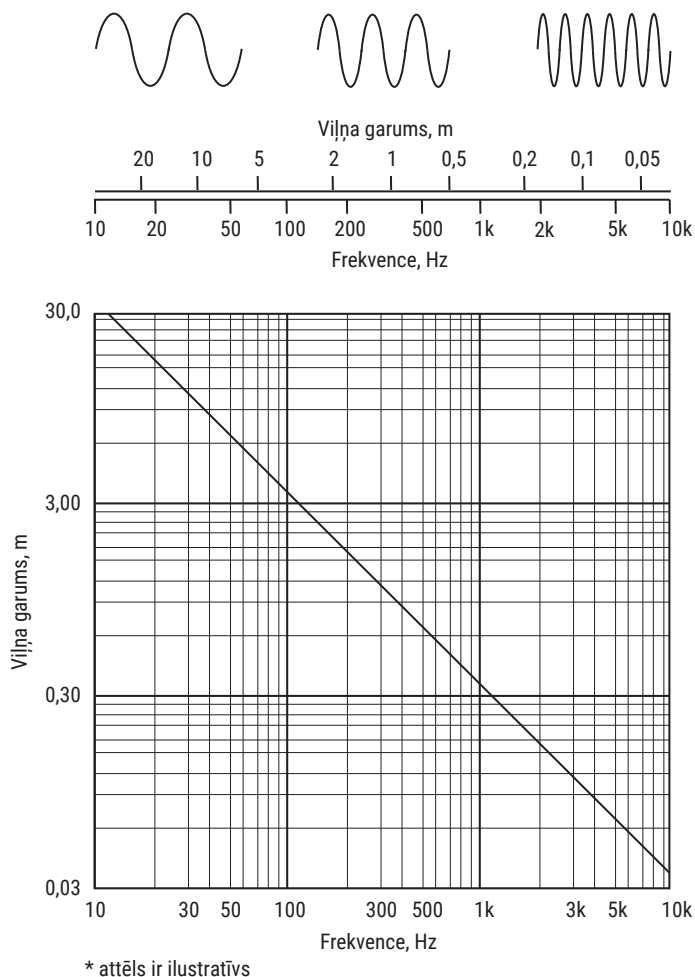
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{\text{m/s}}{1/\text{s}}, \text{ m}; \quad (2.14.)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{\text{m/s}}{\text{m}} = \frac{1}{\text{s}}, \text{ Hz}; \quad (2.15.)$$

$$\lambda = \frac{343}{f}, \text{ m}; \quad (2.16.)$$

$$T = \frac{1}{f}, \text{ s}. \quad (2.17.)$$

Šīs savstarpējās sakarības, iespējams, ir svarīgākās akustikā. Grafiskās attiecības starp frekvenci un viļņa garumu redzamas 2.13. attēlā.



2.13. att. Viļņa garuma un frekvences attiecības.

Vēl viens parametrs, kas raksturo skaņu, ir spiediena izmaiņu amplitūda un tā ir izmērāma (2.12. att.). Skaņa izplatās vidē ar atmosfēras spiedienu (sk. 2.11. att.), radot pozitīvu un negatīvu spiedienu (pusperiodi). Maksimālo spiedienu apzīmē ar P_M un mēra paskālos (Pa). Momentānā spiediena vērtība ir spiediena lielums konkrētā laika mirklī. Efektīvo vērtību P_{rms} var noteikt kā vidējo kvadrātisko (*RMS*) un tā ir:

$$P_{rms} = 0,707P_m. \quad (2.18.)$$

Vispārējie frekvenču diapazoni un to lietojums. Frekvenču diapazons no 0 Hz līdz saules gaismai sadalījums apkopots 2.1. tabulā.

2.1. tabula

Frekvence	Lietojums
0 Hz	Līdzspriegums DC, baterijas, akumulatori, vadības spriegums
50 (60) Hz	Maiņspriegums AC (tīkla spriegums)
20 Hz–20 kHz	Dzirdamā audiofrekvence (aptuveni)
44,1; 48; 88,2; 96 kHz	Standartizētas audiosignāla diskretizācijas frekvences
30 kHz–30 MHz	LF, MF, HF radio frekvences
560–1600 kHz	AM radio nesējfrekvenču diapazons
88–108 MHz	FM radio nesējfrekvenču diapazons
30–300 MHz	VHF: mobilie telefoni, TV, radio, bezvadu mikrofoni
0,3–5,8 GHz	UHF: TV, bezvadu mikrofoni, mobilie telefoni
3–300 GHz	Pavadoņu komunikācija, mikroviļņu ierīces, radari
0,3–400 THz	Infrasarkanā gaisma, optiskie viļņvadi
400–750 THz	Redzamā gaisma

2.4. AUDIOFREKVENČU DIAPAZONS

Par audiofrekvenču diapazonu ir pieņemts apgabals no **20 Hz** līdz **20 000 Hz**. Praktiski dzirdes augšējā robeža tīram tonim ir no **12 Hz** līdz **18 kHz**, turklāt tas atkarīgs no vecuma, dzimuma un dzirdes trenētības pakāpes. Frekvences zem **20 Hz** cilvēks neuztver kā skaņu un vispār diapazona zemās frekvences vairāk sajūt, nekā dzird kā tīru toni.

Frekvences zem **20 Hz** ir grūti atskaņot, tāpēc tiek veiktas dažādas darbības, lai tomēr šos toņus novadītu līdz klausītājam. Piemēram, tiek atskaņota otrā harmonika, un dzirdes centrs to *translē* atpakaļ uz pamatharmoniku. Rokkoncertā liela izmēra difuzors tiek darbināts ar elektrodzinēju, un klausītāji sajūt šos spēcīgos, zemos viļņus arī ar ķermeni.

2.5. SALIKTAS SVĀRSTĪBAS. HARMONIKAS, FĀZE, OKTĀVAS, MĒRĪJUMU JOSLAS, SPEKTRS, TROKSNIS

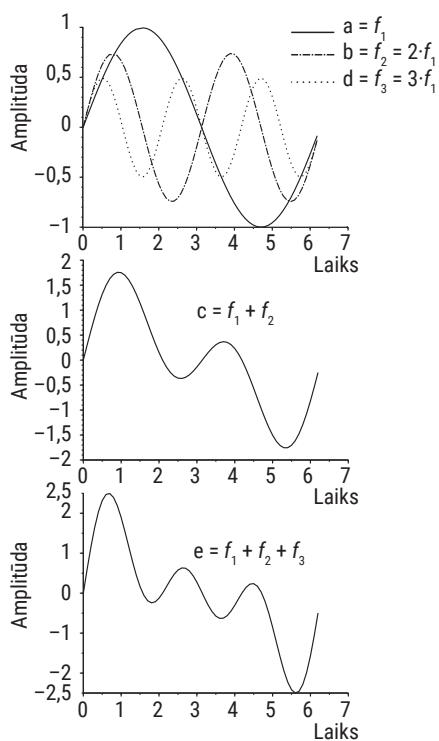
Saliktas svārstības. Runas un mūzikas radīto skaņas viļņu forma būtiski atšķiras no sinusoidāla signāla viļņa formas. Šos viļņus sauc par saliktiem (kompleksiem) viļņiem. Tomēr, lai arī cik sarežģīta ir viļņa forma, lai cik garš ir periods, to var reducēt uz sinusoidālām komponentēm.

Spēkā ir arī pretējā darbība. Jebkuru kompleksu, periodisku vilni ir iespējams sintezēt no sinusoidāliem viļņiem ar dažādu frekvenci, dažādām amplitūdām un dažādām nobīdēm laikā (fāzēm). Jozefs Furjē (*Joseph Fourier*) bija

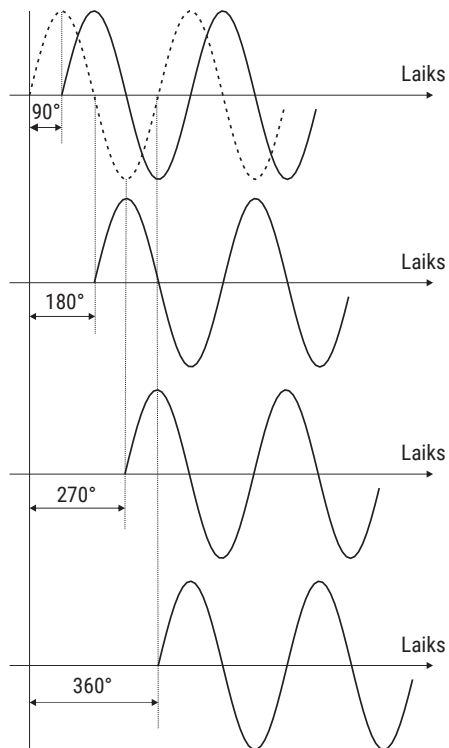
pirmais zinātnieks, kurš pierādīja šīs sakarības. Ideja ir vienkārša, bet bieži vien tās realizācija ir apgrūtināta saistībā ar runas vai mūzikas specifiskajām īpatnībām.

Virstoņi-harmonikas. 2.14. att. līkne a attēlo sinusoidālas svārstības ar noteiktu amplitūdu A_1 un frekvenci f_1 . Savukārt līkne b – svārstības ar amplitūdu $A_2 = \frac{3}{4} A_1$ un divreiz augstāku frekvenci $f_2 = 2f_1$. Virzoties pa laika asi un summējot šo līkņu momentānos punktus (der arī grafiskā summēšana), iegūstam līkni c, kas vairs nav sinusoidāla. Līknei d atbilst svārstības ar trīs reizes augstāku frekvenci $f_3 = 3f_1$, un tās amplitūda ir $A_3 = \frac{1}{2} A_1$. Summējot līknes c un d, iegūstam jaunu līkni e.

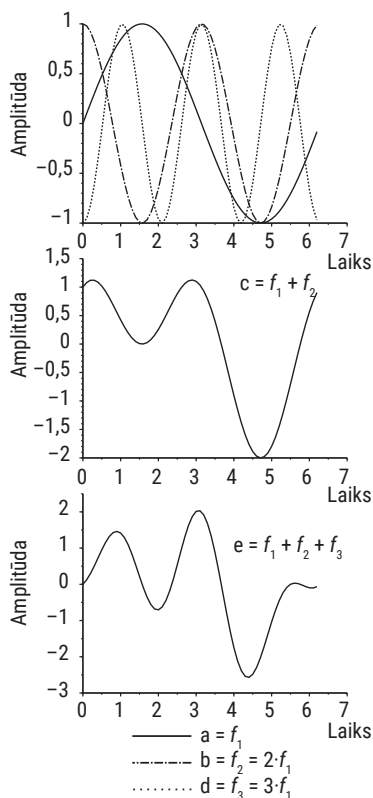
Neatkarīgi no tā, vai tie ir akustiskie viļņi vai elektrisks signāls, var veikt pretējo darbību. Proti, no kompleksā viļņa var izdalīt visus trīs sākotnējos viļņus – sinusoidālas svārstības f_1, f_2, f_3 . To var paveikt, izmantojot akustiskos vai elektriskos filtrus (joslas filtri, nogriešanas filtri, korķa filtri). Sinusoidālu signālu ar viszemāko frekvenci f_1 sauc par pamatfrekvenci. Frekvenci, kura ir



2.14. att. Kompleksas svārstības. Signāli vienā fāzē.



2.15. att. Fāžu attiecības.



2.16. att. Kompleksas svārstības.
Signāli nav vienā fāzē.

un veicot to identiskās fāzēs. 2.14. att. visas līknes f_1 , f_2 , f_3 ir sinfāzas. Bet kas notiek, ja harmonikas nav vienā fāzē ar pamatfrekvenci? 2.16. att. ilustrē šādu gadījumu.

Harmonikas f_2 un f_3 ir nobīdītas fāzē pret pamatfrekvenci. Harmonika f_2 apsteidz, bet f_3 atpaliek. Veicot summēšanu, kā 2.14. att., iegūsim jaunu līkni e. Atšķirīgo formu iemesls starp 2.14 att. e un 2.16 att. e ir tikai un vienīgi pamatfrekvences un harmoniku fāžu atšķirības. Kaut gan signālu e forma ir ļoti atšķirīga, dzirde nav īpaši jutīga pret to. Proti, dzirde šīs skaņas uztvers gandrīz kā līdzvērtīgas.

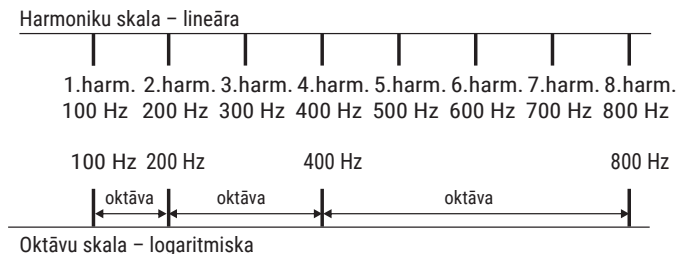
Bieži vien fāze kļūdaini tiek pielīdzināta polaritātei un otrādi. Fāze ir laika attiecība (nobīde) starp diviem signāliem, bet polaritāte +/- vai -/+ attiecība starp signālu pāra vadāmību – izvadiem.

Oktāvas. Audio inženieri un akustiķi lielākoties lieto jēdzienu harmonikas, jo tas ir tuvāks skaņas fizikālajiem parametriem, protams, tiek runāts arī par oktāvām, kas savukārt ir tuvākas mūziķiem. Oktāva ir logaritmisks jēdziens,

divas reizes augstāka, sauc par otro harmoniku $f_2 = 2f_1$, trešā harmonika ir $f_3 = 3f_1$ un tā tālāk.

Fāze. 2.14. att. līknes a, b, d sākas no nulles (amplitūda = 0) un vienā un tai pašā mirklī (laiks = 0). Tās ir vienā fāzē. Praksē ir sastopami gadījumi, kad laika attiecība starp harmonikām vai starp pamatfrekvenci un harmonikām stipri atšķiras no 2.14. att. piemērā redzamā. Aplūkosim automobiļa dzinēju. Tā kloķvārpsta, veicot vienu pilnu apgriezību (360°), nodrošina virzulim vienu harmoniskas kustības ciklu. Virzuļa kustību augšup lejuļp izvērsot laikā, tiek iegūta sinusoidāla līkne, augšējais 2.15. attēls.

Viens sinusoidāla viļņa cikls ir ekvivalents 360° rotācijas pagriezienam. Ja kāds cits vilnis ar tādu pat frekvenci tiek aizturēts par 90° , tad tam ir $1/4$ viļņa garuma laika nobīde (laiks pieaug pa labi). $1/2$ viļņa laika nobīde ir 180° un tā tālāk. Ja laika nobīde ir 360° , tad augšējais un apakšējais vilnis ir sinhronizējušies (ir sinhroni, sinfāzi), sasniedzot pozitīvās un negatīvās virsotnes vienlaikus



2.17. att.
Harmonikas un
oktāvas.

kas ir saistīts ar muzikālo skalu, terminoloģiju un ir tuvs dzirdes raksturlielumiem. Visur tur, kur ir saistība ar skaņu un dzirdi, tiek lietotas frekvenču logaritmiskās skalas, logaritmiskās mērvienības, kā arī daudz un dažādas ierīces, balstītas uz dalījumu oktāvās. Harmonikas un oktāvas ir salīdzinātas 2.17. attēlā.

Harmoniku skala ir lineāra. Katra nākamā frekvence ir pamatfrekvences reizinājums ar veselu skaitli. Savukārt oktāva ir definēta kā divu frekvenču attiecība – 2:1. Piemēram, nots **C4 (Do)** skan tuvu frekvencei 261 Hz. Nākamā augstāka nots **C5** ir ar frekvenci **522 Hz**. Frekvenču attiecības ir raksturīgas muzikālajai skalai. Intervāls starp **100 Hz** un **200 Hz** ir oktāva, tāpat kā intervāls starp **200 Hz** un **400 Hz**. Intervāls starp **100 Hz** un **200 Hz** tiek uztverts kā lielāks nekā intervāls starp **200 Hz** un **300 Hz**. Tas parāda, ka auss intervālus drīzāk uztver kā attiecību, nevis matemātisku starpību.

Tā kā frekvenču attiecība 2:1 ir definēta kā oktāva, tad tās matemātiskais vienādojums ir:

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^n, \quad (2.19.)$$

kur f_2 – oktāvu intervāla augšējā frekvence;

f_1 – oktāvu intervāla apakšējā frekvence;

n – oktāvu skaits.

Ja ir viena oktāva, tad $n = 1$ un $\frac{f_2}{f_1} = 2$.

1. piemērs: $f_1 = 20 \text{ Hz}$, $n = 10$, $f_2 = ?$

$$f_2/20 = 2^{10}$$

$$f_2 = 20 \cdot 2^{10} = 20 \cdot 1024 = 20480 \text{ Hz}$$

2. piemērs: $f_1 = 446 \text{ Hz}$, $n = \frac{1}{3}$, $f_2 = ?$

$$\frac{f_2}{446} = \sqrt[3]{2}$$

$$f_2 = 446 \cdot 1,2599 = 561,9 \text{ Hz}$$

3. piemērs: Kāda ir zemākā frekvence, ja ir $\frac{1}{3}$ oktāvas josla ar centrālo frekvenci 1000 Hz?

$f_1 = 1000$ Hz, bet zemākā frekvence būs $\frac{1}{6}$ oktāvas zemāk nekā $\frac{1}{3}$ oktāva.

$$\text{Tātad } n = \frac{1}{6}$$

$$f_2 / f_1 = \frac{1000}{f_1} = \sqrt[6]{2}$$

$$f_1 = \frac{1000}{\sqrt[6]{2}}$$

$$f_1 = \frac{1000}{1,12246} = 890,9 \text{ Hz}$$

4. piemērs: Kāda ir zemākā frekvence, ja ir josla ar centrālo frekvenci 2500 Hz?

$$\frac{2500}{f_1} = \sqrt[3]{2}$$

$$f_1 = \frac{2500}{\sqrt[3]{2}}$$

$$f_1 = \frac{2500}{1,4142} = 1767,8 \text{ Hz}$$

Kāda ir augšējā frekvence?

$$\frac{f_1}{2500} = \sqrt[3]{2}$$

$$f_2 = 2500 \cdot \sqrt[3]{2}$$

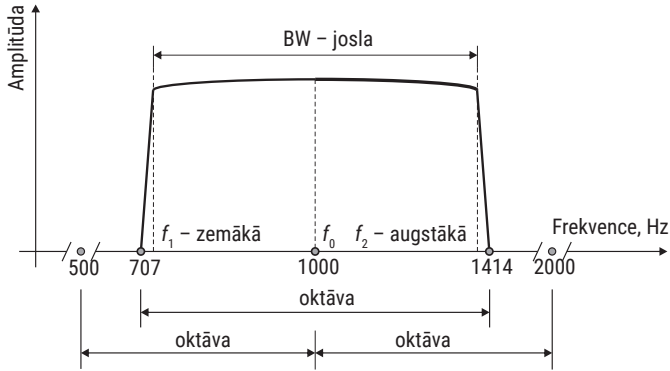
$$f_2 = 2500 \cdot 1,4142 = 3535,5 \text{ Hz}$$

Mērījumu joslas. Akustisko mērījumu veikšanai viss dzirdamo skaņu frekvenču diapazons (**20–20 000 Hz**) ir sadalīts apgabalos – oktāvās. Savukārt oktāvām ir divas skalas: oktāvas un $1/3$ oktāvas skalas, standarts *IEC 61260 (EN ISO 266)*.

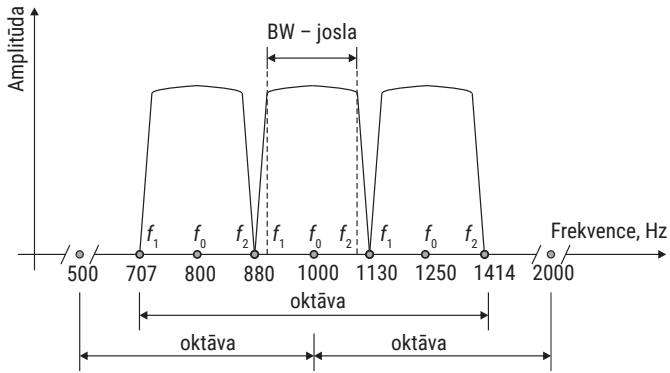
Katrai oktāvai ir izdalītas joslas (*Bandwith – BW*) ar centrālo frekvenci un tai piesaistīto zemāko un augstāko frekvenci. $1/3$ oktāvas skalā ir trīs centrālās frekvences un tām piesaistītās zemākās un augstākās frekvences (2.18. un 2.19. att.). Atkarībā no nepieciešamās mērījumu precizitātes ir iespējams izvēlēties vienu vai otru dalījuma skalu. Oktāvu centrālās frekvences savstarpēji attiecas kā 1:2.

Pamatformulas joslas frekvenču aprēķiniem:

Oktāvas filtri:



2.18. att. Oktāvas joslas filtrs ar platumu 70,7 %.



2.19. att. 1/3 oktāvas joslas filtri ar platumu 23 %.

$$f_1 = \frac{f_2}{2} = 0,5 \cdot f_2; \quad (2.19.)$$

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^n; \quad (2.20.)$$

$$f_D = \sqrt{(f_1 \cdot f_2)} = \sqrt{2} \cdot f_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot f_2; \quad (2.21.)$$

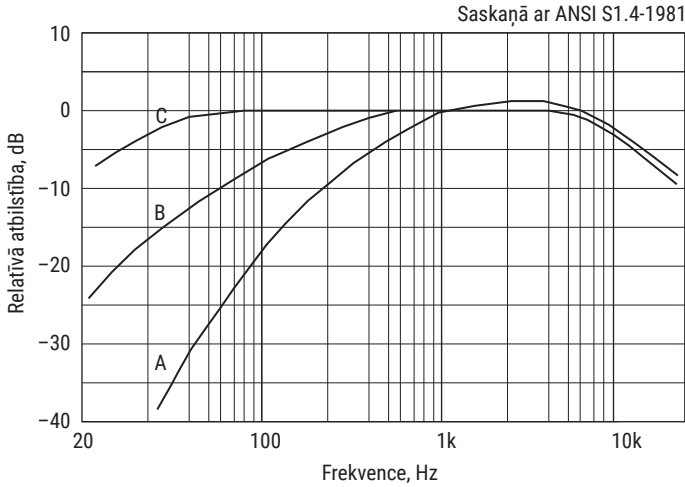
$$BW = f_2 - f_1 = \left(\sqrt{2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \cdot f_D = 0,707106781 \cdot f_D; \quad (2.22.)$$

1/3 oktāvas filtri:

$$f_1 = \frac{f_2}{\sqrt[3]{2}} = 0,793700626 \cdot f_2; \quad (2.23.)$$

$$f_2 = \sqrt[3]{2} \cdot f_1 = 1,25992105 \cdot f_1; \quad (2.24.)$$

$$f_D = \sqrt{(f_1 \cdot f_2)} = \sqrt[6]{2} \cdot f_1 = \frac{1}{\sqrt[6]{2}} \cdot f_2; \quad (2.25.)$$



2.20. att. Svērto filtru raksturlīknes.

$$BW = \sqrt[6]{2} - \frac{1}{\sqrt[6]{2}} \cdot f_0 = 0,231563329 \cdot f_0; \quad (2.26.)$$

kur: f_0 – centrālā oktāvas vai $\frac{1}{3}$ oktāvas filtra frekvence, Hz;

f_1 – apakšējā oktāvas vai $\frac{1}{3}$ oktāvas filtra frekvence, Hz;

f_2 – augšējā oktāvas vai $\frac{1}{3}$ oktāvas filtra frekvence, Hz;

BW – $(f_2 - f_1)$ filtra joslas platums, Hz.

Veicot mērījumus, oktāvas un $\frac{1}{3}$ oktāvas filtri tiek plaši lietoti šādās nozarēs:

- medicīna. Dzirdes analīze;
- industrija. Industriālo trokšņu izpēte;
- arhitektūra un celtniecība. Būvakustika;
- mašīnbūve. Darbmašīnu un ierīču izstrāde un ekspluatācija.

Praktiskajos mērījumos tiek izmantoti skaņas līmeņa mērītāji, ar kuru palīdzību nosaka skaņas spiediena līmeni (*Sound Pressure Level – SPL*). Skaņas spiediens tiek noteikts **dB**, attiecinot to pret standarta līmeni **20 μ Pa**.

Cilvēka dzirdes raksturlīkne audio diapazonā nav plakana. Tā ir vājināta gan zemajā, gan augstajā diapazona daļā. Sevišķi šis vājinājums izpaužas pie zemiem skaļuma līmeņiem. Tāpēc līmeņa mērītājiem var iestatīt dažādas mērīšanas frekvenču raksturlīknes, kuras emulē cilvēka dzirdi. Tās ir tā sauktās svērto filtru raksturlīknes A, B, C. (2.20. att.).

A raksturlīkne ir inversa **40 fonu** dzirdes raksturlīknei, B un C attiecīgi **70** un **100 fonu** raksturlīkņēm (par mērvienību fons (**phon**) un saistītajām līkņēm turpmākajā izklāstā). Filtra tipu izvēlas atkarībā no tā skaņas spiediena līmeņa un mērāmās vides (fona troksnis, avio dzinējs utt). Daži piemēri:

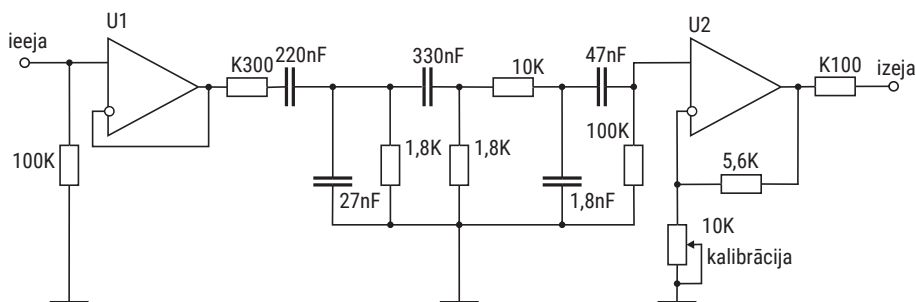
- A filtrs, ja *SPL* ir 20–55 dB;

- B filtrs, ja *SPL* ir 55–85 dB;
- C filtrs, ja *SPL* ir 85–140 dB.

Šīs raksturlieknes ir tuvas skaņas relatīvajam skaļumam. Tomēr B un C raksturlieknes neatbilst cilvēka dzirdes uztverei, un B raksturliekne vispār netiek ieteikta. Standarts *IEC 61672* iesaka arī raksturliekni Z, kas ir plakana.

A filtru plaši lieto, veicot akustisko un vides trokšņu mērījumus. Veicot mērījumus ar svērto A filtru, mērvienība ir **dBA** vai **dB(A)**. Veicot **dBA** mērījumus ar kalibrētu mikrofonu, **dB SPL** līmenis ir attiecināts pret **20 μPa = 0 dB SPL** līmeni. Parasti **dBA** mērījumi ir mazāki salīdzinājumā ar nesvērtajiem **dB** mērījumiem.

Tā kā A filtra raksturliekne virs **1 kHz** pēc būtības ir plakana, tad mērījumu starpība starp A filtru un nesvērto izpaudīsies raksturlieknes zemo frekvenču daļā. Piemēram, ja mērījumi savstarpēji ļoti atšķiras, tas nozīmē, ka signāls satur daudz zemo frekvenču. Papildu informācija par svērtajiem filtriem ir atrodamā jau minētajā standartā *IEC 61672*. Veicot frekvenču mērījumus ar minētajiem svērtajiem filtriem, nevar iegūt ticamu rezultātu par skaļumu, un šie rezultāti der tikai līmeņu salīdzināšanai. Ja nepieciešams veikt skaņas frekvenču analīzi, iesaka lietot oktāvas vai 1/3 oktāvas filtrus, piemēram:



2.21. att. Praktisks svērtais filtrs ar A raksturliekni.

2.2. tab. ir apkopots standarta **ISO266 (IEC61260)** ieteiktais 1 un $\frac{1}{3}$ oktāvu frekvenču joslu iedalījums.

Ir vēlams atcerēties $\frac{1}{3}$ oktāvas centrālo frekvenču rindas sākumu. Piemēram, **31,5; 40; 50; 63...** Logaritms \log_{10} šīm frekvencēm ir **1,5; 1,6; 1,7; 1,8 ...**. Tad, zīmējot grafiku logaritmiskā mērogā, šīs frekvences uz abscisas skalā starp **10** un **100** būs punktos **0,5; 0,6; 0,7; 0,8** un attiecīgi tā arī tālāk.

Spektrs. Kā jau zinām, vispārpieņemtais skaņas spektra diapazons ir no **20** līdz **20 000 Hz**. Šis ir aptuvenš frekvenču diapazons, kuru spēj uztvert cilvēka dzirde. Diapazons ir viens no cilvēka dzirdes raksturlielumiem. Sinusoidālu svārstību un harmoniku kontekstā aplūkosim jēdzienu *spektrs*.

2.2. tabula

Joslas numurs (ISO266)	Joslas numurs (IEC61260)	1 oktāvas joslas centrālā frekvence f_0	Joslas zemākā frekvence f_1	1/3 oktāvas joslas centrālā frekvence f_0	Joslas augstākā frekvence f_2
14			22	25	28
15	-15	31,5	28	31,5	35
16			35	40	44
17			44	50	57
18	-12	63	57	63	71
19			71	80	88
20			88	100	113
21	-9	125	113	125	141
22			141	160	176
23			176	200	225
24	-6	250	225	250	283
25			283	315	353
26			353	400	440
27	-3	500	440	500	565
28			565	630	707
29			707	800	880
30	0	1000	880	1000	1130
31			1130	1250	1414
32			1414	1600	1760
33	3	2000	1760	2000	2250
34			2250	2500	2825
35			2825	3150	3530
36	6	4000	3530	4000	4400
37			4400	5000	5650
38			5650	6300	7070
39	9	8000	7070	8000	8800
40			8800	10000	11300
41			11300	12500	14140
42	12	16000	14140	16000	17600
43			17600	20000	22500

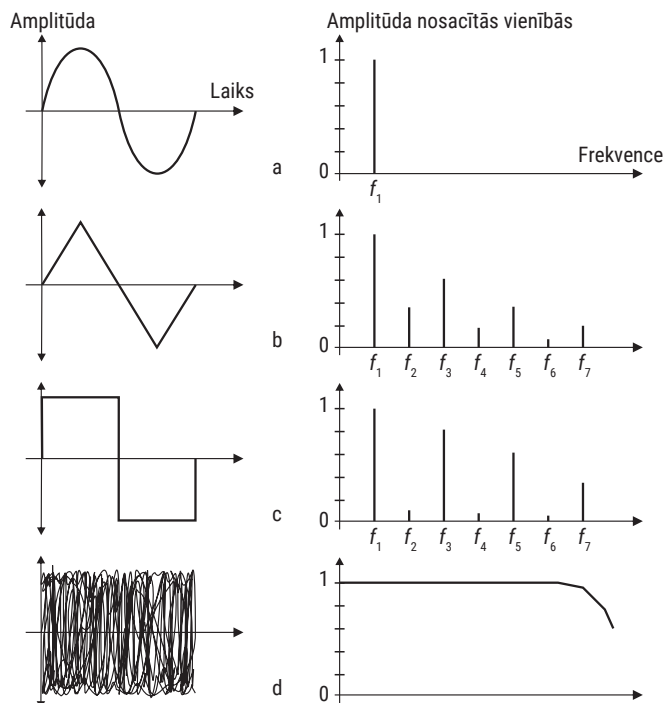
Redzamās gaismas spektram ir līdzība ar skaņas dzirdamības spektru skaņas diapazonā. Mēs nevaram saskatīt ultravioleto gaismu, jo tās elektromagnētiskās enerģijas viļņu frekvence ir par augstu redzes receptoriem, savukārt infrasarkanās gaismas frekvence ir par zemu. Tas pats notiek arī ar cilvēka dzirdi, kur ultraskaņa ir par augstu un infraskaņa ir par zemu, lai tās dzirdētu.

2.22. att. ir redzamas tikai dažas svārstību formas, ar kādām nākas sastapties gan akustikā, gan elektroakustikā (skaņu tehnikā).

Kreisajā pusē ir oscilogrammas un labajā pusē – to spektrs. Signāla spektrs parāda, kā signāla enerģija ir sadalīta pa frekvencēm. 2.22 att. a ir iegūts ar spektra analizatoru, kuram mērīšanas laikā iestatīta ļoti šaura caurlaides josla – tikai **5 Hz**. Sinusoidālu svārstību gadījumā visa enerģija ir koncentrēta vienā frekvencē.

Nav ideālu sinusoidas ģeneratoru, kas spētu radīt ideālas svārstības, kurām nebūtu harmoniku. Taču, veicot spektra analīzi, iegūtais harmoniku lielums ir pārāk mazs, lai tās ievērotu. Simetrisku trīsstūrveida svārstību gadījumā redzams (2.22 att. b), ka vislielākā amplitūda ir pamatfrekvencei jeb pirmajai harmonikai f_1 . Turpmākās harmonikas aiz f_7 ir niecīgas un tās netiek ņemtas vērā. Šādas formas svārstībām ir nepāra un pāra harmonikas.

Zinot katras harmonikas frekvenci un fāzi, tās kombinējot, ir iespējams sintezēt simetriskas trīsstūrveida svārstības. Veicot līdzīgu analīzi simetriskām taisnstūrveida svārstībām (2.22 att. c), iegūstam spektru, kur tā frekvenču amplitūdu vērtības ir lielākas salīdzinājumā ar iepriekš apskatīto trīsstūrveida svārstību spektru, un īpaši izceļas nepāra harmonikas.



2.22. att. Dažādu formu svārstības un to spektrs.

2.23 att. a redzamas taisnstūrveida svārstības, kuras var sintezēt, ja pamatfrekvencei pievieno harmonikas. Attēls ir ilustratīvs.

Lai to paveiktu, ir nepieciešamas daudzas harmonikas. 2.23 att. b redzamās svārstības var iegūt, pievienojot pamatfrekvencei divas harmonikas. Savukārt, lai iegūtu 2.23 att. c redzamās svārstības, ir nepieciešamas vienpadsmit harmonikas. Redzams, ka iegūtais rezultāts ir tālu no taisnstūrveida formas. Harmoniku joslai ir jābūt daudz plašākai. Sinusoidālu, trīsstūrveida un taisnstūrveida svārstību spektrs parāda, ka svārstību enerģija uzkrājas harmoniskās, nevis starp tām. Šīs svārstības ir ar periodisku viļņa formu un atkārtojas ciklu pēc cikla. 2.22. att. d redzamais ir gadījuma process – baltais troksnis.

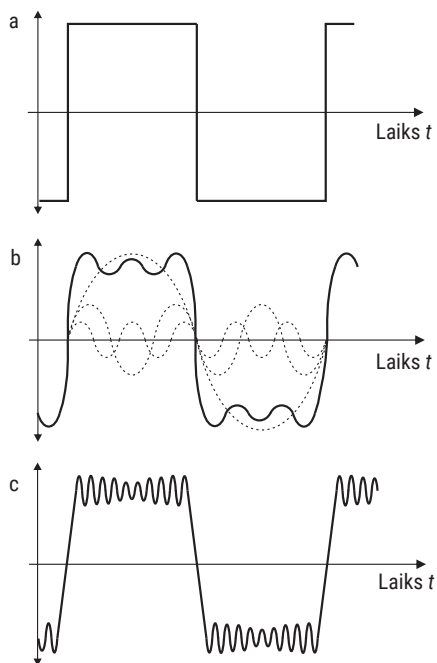
Mērot baltā trokšņa spektru ar analizatoru, kuram ir iestatīta **5 Hz** josla, nav iespējams iegūt apmierinošu rezultātu, jo fluktuācijas (deviācijas) ir tik lielas, ka nav iespējams iegūt precīzus mērījumus. Ņemot platāku joslu fiksētā frekvenču diapazonā un lietojot dažādas integrējošas mēriekārtas, ir iespējams iegūt pastāvīgus mērījumus – spektra līkni. Līkne parāda, ka trokšņu signāla enerģija ir vienmērīgi sadalīta frekvenču diapazonā. Līknes kritums augsto frekvenču daļā norāda uz to, ka ir sasniegta trokšņu ģeneratora joslas augšējā robeža.

Ja aplūkojam sinusoidāla signāla un trokšņa oscilogrammas, ir iespējams novērot nelielu līdzību, turklāt tur ir apslēptas savstarpējas sakarības. Trokšņa

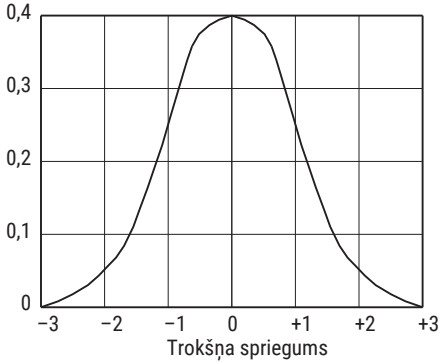
signālu var uzskatīt par signālu, kuru veido sinusoidāli signāli ar mainīgu frekvenci, amplitūdu un fāzi. Ja trokšņa signālu filtrē ar šauras joslas filtru, tad osciloskopā var novērot slidošas, sinusoidālām svārstībām līdzīgas mainīgu amplitūdu līknes. Teorētiski ar pietiekami šauras joslas filtru no trokšņa var izdalīt tīru sinusoidālu signālu.

Trokšnis. Trokšņu avoti ir gan akustiskajā laukā, gan elektroniskajās shēmās. Dažkārt tie ir mūsu sabiedrotie, piemēram, veicot mērījumus. Bet lielākoties tie nav vēlamī, un to ierobežošana ne vienmēr ir vienkārša. Trokšnis ir gadījuma process, to raksturo Gausa sadalījuma (normālsadalījuma) līkne (2.24. att.). Jo vairāk mērījumu, jo tuvāk šai līknes formai.

Baltais un rozā troksnis. Balto un rozā troksni bieži izmantoto kā



2.23. att. Taisnstūrveida svārstību sintēze.



2.24. att. Gausa sadalījums jeb normālsadalījums.

testa signālus. Baltais troksnis ir līdzīgs baltajai gaismai. Tiem abiem ir vienāda intensitāte pie dažādām frekvencēm un nemainīgs enerģijas spektrālais blīvums. Proti, baltā gadījums trokšņa enerģijas lielums katrā **1 Hz** joslā ir aptuveni vienāds. Vēl arī mēdz teikt: enerģija uz hercu. Ja enerģijas sadalījumu uz frekvenču ass zīmējam logaritmiskā mērogā, tad redzam, ka tā ir plakana (2.25. att. līkne a).

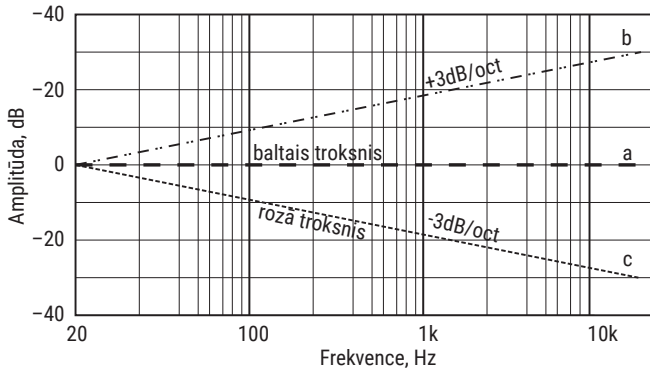
Tā kā katra nākamā oktāva ietver sevī divas reizes vairāk **1 Hz** joslu, tad ar katru nākamo oktāvu baltā trokšņa

enerģija dubultojas. Dzirdē balto troksni uztver kā augstu toņu šņākoņu.

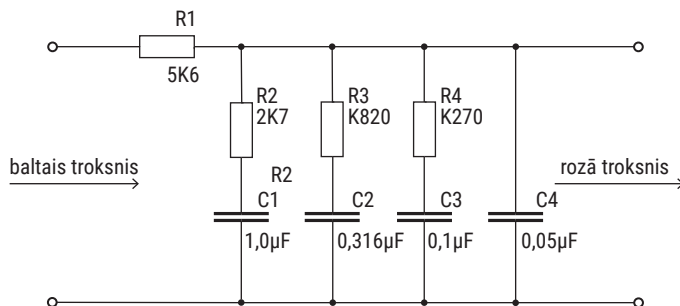
Rozā troksnim ir aptuveni vienāda enerģija katras oktāvas diapazonā, kā arī 1/3 oktāvas diapazonā. Rozā troksnis satur lielāku enerģiju zemāko frekvenču apgalā, un līdz ar to salīdzinājumā ar balto troksni dzirdē vairāk uztver zemās frekvences. Spektra enerģijas līknes kritums ir **-3 dB/oct** (2.25. att. līkne c).

Praksē akustiskajos mērījumos lielākoties izmanto rozā troksni, bet elektriskajos – balto troksni. Rozā trokšņa enerģijas izplatība ir tuvāka dzirdes subjektīvajai skaņas uztverei. Piemēram, ja akustiskā sistēma ir ar plakānu raksturlīkni un ieejā pievada rozā troksni, un mērīšanai izmanto oktāvas filtrus, tad izejas raksturlīkne arī būs plakana.

Atbilstoši trokšņa nosaukumam ir arī baltā un rozā trokšņa analizatori. Viens analizatoru tips ir ar konstantu frekvenču caurlaides joslas platumu. Piemēram, **5 Hz**. Ja ar šādu analizatoru mēra balto troksni, tad atkal tiks iegūta plakana raksturlīkne, jo konstantai joslai piemīt konstanta lieluma enerģija.



2.25. att. Trokšņu līknes.



2.26 .att. Baltā-rozā trokšņa filtrs.

Savādāk ir, ja izmanto analizatoru, kura caurlaides joslas platums ir atkarīgs no centrālās frekvences (filtra labums Q). Te kā piemērs kalpo 1/3 oktāvas analizators, jo tas ir tuvāks cilvēka dzirdes īpatnībām dzirdamās skaņas diapazonā. 1/3 oktāvas filtra josla pie **100 Hz** ir **23 Hz**, bet pie **10 kHz** josla ir **2,3 kHz**. Līdz ar to ietvertais enerģijas daudzums **2–3 kHz** joslā ir lielāks nekā **100 Hz** joslā.

Mērot balto troksni ar konstanta labuma filtriem, tiek iegūta kāpjoša līkne ar slīpumu **+3 dB/oct** (2.25. att. līkne b). Mērot frekvenču raksturlīknes telpām, aparatūrai, mērkomplekss nedrīkst ietekmēt mērījumu ticamību. Tāpēc izmanto rozā troksni. Tas kombinācijā ar 1/3 oktāvas filtriem, kuriem konstants labums Q , dod taisnu raksturlīkni, kuru ietekmē tikai mēroobjekta frekvenču parametri.

$$Q = \frac{f_0}{f_{BW}}, \quad (2.27.)$$

kur: f_0 – centrālā frekvence;
 f_{BW} – joslas platums –3 dB līmenī.

2.6. SKAŅAS LĪMEŅA MĒRĪJUMI. SINUSOIDĀLA SIGNĀLA MĒRĪJUMI

Skaņas līmeņa mērījumi. Skaņas līmeņa mērījumi ir pamats visiem ar akustiku saistītajiem darbiem. Uz jautājumu, piemēram, *cik skaļi patlaban skan mūzika*, nav vienkāršas un īsas atbildes. Ar mēraparatūras palīdzību var vienkārši noteikt skaņas spiediena līmeni, bet ir daudz veidu, kā aprakstīt skaņas ietekmi uz cilvēka dzirdi. Skaņas spiedienu parasti mēra diskrētā klausītāja atrašanās vietā.

Spiediena mērījumus var veikt dažādos veidos. Tie var būt momentāni, integrēti noteiktā laika intervālā vai frekvenču svērtie caur filtriem. Mērinstrumenti ar īsu reakcijas laiku sniedz informāciju par pīķiem un pārejas

procesiem skaņas materiālā. Savukārt mērinstrumenti ar lielu reakcijas laiku dod pilnīgāku informāciju par skaļumu un enerģiju skaņas materiālā.

Skaņas spiediena mērītājs principā ir voltmeters, kura ieejā ir spiedienjutīgs mikrofons. Ja nepieciešams nomērīt vienkāršu skaņu, tad tās parametri, lai kam ritot, ir nemainīgi. Daudz sarežģītāk ir veikt mērījumus saliktai skaņai, piemēram, runai, mūzikai. Te ir nepieciešams mērījumus attēlot grafiski izvērstus laikā.

Akustisko signālu bieži raksturo, izmantojot nevis skaņas spiediena, intensitātes un blīvuma absolūtos lielumus, bet gan relatīvu logaritmisku vienību – *bels*, par godu Aleksandram Greiemam Bellam (*Alexander Graham Bell*). Ja mērījumus izteic belos, tad bieži vien tiek iegūtas gaužām mazas vērtības. Tāpēc ērtības labad ir pieņemta mērvienība decibels **dB**, kas ir **1/10** no *bela*. Decibels ir **10log** pie bāzes **10** no divu lielumu attiecības.

Akustiskā materiāla (runa, mūzika) saturu nosaka mainīgo lielumu attiecības, nevis to absolūtās vērtības. Logaritmēšanas rezultātā attiecību vietā iegūst starpības, ar kurām ērtāk rīkoties aritmētiski. Decibelos izteiktas intensitāšu, blīvuma un spiedienu attiecības sauc par līmeņiem.

Skaņas intensitātes līmeni noteic šāda sakarība:

$$N = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right), \quad (2.28.)$$

kur: I – skaņas intensitāte;

I_0 – skaņas intensitāte, kas atbilst, tā sauktajam nulles līmenim.

Starptautiski ir pieņemts, ka skaņas intensitātes lielums ir: $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Šis ir lielums, kas atbilst tikko dzirdamas skaņas intensitātei tajā frekvenču apgabalā, kurā auss ir visjutīgākā. Skaņas spiediena P mērvienība SI sistēmā ir paskāls Pa (ņūtons uz kvadrātmetru).

Sinusoidālam signālam par pozitīvo pusperiodu pieņem to, kura laikā spiediens ir lielāks par vidējo atmosfēras spiedienu (vidē ir sablīvējums), savukārt par negatīvo pieņem to, kura laikā ir vides retinājums.

Skaņas spiediena līmeni noteic sakarība:

$$N = 10 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right), \quad (2.29.)$$

kur: p – efektīvais skaņas spiediens;

p_0 – efektīvais spiediens, kas atbilst skaņas intensitātei I_0 .

Starptautiski ir pieņemts, ka $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$.

Skaņas blīvuma līmeni noteic sakarība:

$$N = 10 \log \left(\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_0} \right), \quad (2.30.)$$

kur: \mathcal{E} – blīvums;

$$\mathcal{E}_0 = \frac{I_0}{c_0} = 3 \cdot 10^{-15} \frac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}.$$

Aptuveni šāds enerģijas blīvums dzirdamo frekvenču apgabalā piemīt gāzes termiskajām fluktuācijām istabas temperatūrā. Ja auss jutība būtu lielāka, tā gāzes molekulu termisko kustību uztvertu jau kā troksni. Atliek secināt, ka auss jutība ir izveidojusies atbilstoši bioloģiskajam optimumam. Tālab ir problemātiski izveidot tādu mikrofonu vai kādu citu skaņas uztvērēju, kura jutība būtu augstāka par cilvēka auss jutību.

Decibelos izteic arī elektrisko signālu līmeņus. Jaudas līmenis:

$$N = 10 \log \left(\frac{P}{P_0} \right), \quad (2.31.)$$

kur: P_0 – jauda, kas atbilst nulles līmenim.

Starptautiski ir pieņemts: $P_0 = 1 \text{ mW} = 0,001 \text{ W}$.

Ja jauda P izdalās uz pretestības Z , var noteikt sprieguma un strāvas efektīvo vērtību līmeņus:

$$N = 10 \log \left(\frac{U^2}{P_0 Z} \right) = 20 \log \left(\frac{U}{U_0} \right); \quad (2.32.)$$

$$N = 10 \log \left(\frac{I^2 Z}{P_0} \right) = 20 \log \left(\frac{I}{I_0} \right). \quad (2.33.)$$

Vēsturiski, kopš vadu sakaru tehnikas attīstības laikiem, ir definētas P_0 un Z vērtības. P_0 bija nepieciešamais jaudas lielums sakaru nodrošināšanai, savukārt Z bija divvadu gaisa līnijas viļņa pretestība.

Zinot, ka jauda $P_0 = 1 \text{ mW}$ un pretestība $Z = 600 \Omega$, var noteikt nulles līmenim atbilstošo sprieguma un strāvas vērtību:

$$U_0 = \sqrt{P_0 Z} = 0,775 \text{ V} = 775 \text{ mV}. \quad (2.34.)$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{P_0}{Z}} = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 1,29 \text{ mA}. \quad (2.35.)$$

Ja mērījumos ir pieraksts **dBV**, tad nulles līmenis ir 1 V_{RMS} , ja dBu, tad nulles līmenis ir **0,775 V**.

Pierakstot mērījumus, lieto apzīmējumu **dBm**. Šinī gadījumā tas nozīmē, ka decibelu līmenis ir attiecināts pret **1 mW**.

Līmeņa mērītājs **VU**, mēra decibelus, kas ir attiecināti pret **600 Ω** pretestību.

Mērījums **OVU** atbilst **+4 dBm**.

Ja mēra decibelus, attiecinātus pret **1 mW** līmeni, bet pretestība Z_{jaun} ir atšķirīga no **600 Ω**, spēkā ir šāda sakarība:

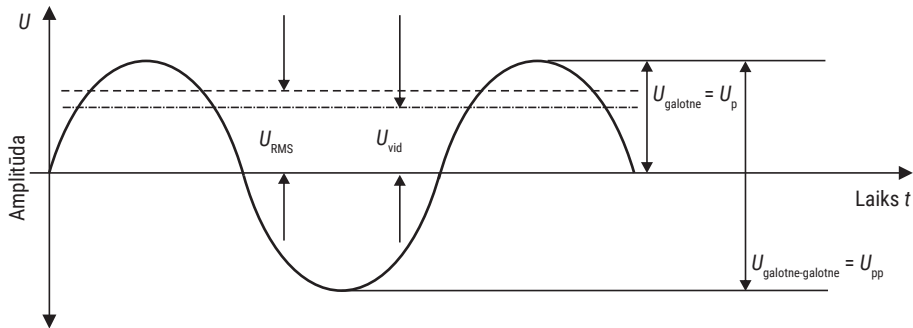
$$\text{dBm pie } Z_{\text{jaun}} = \text{dBm}_{600\Omega} + 10 \log(600\Omega / Z_{\text{jaun}}). \quad (2.36.)$$

Piemērs:

dBm pie **32 Ω** slodzes ir:

$$\text{dBm}_{32\Omega} = 4 \text{ dBm} + 10 \log \left(\frac{600}{32} \right) = 16,75 \text{ dBm}.$$

Parametrs	$10\log_{10}(a_1/a_2)$	$20\log_{10}(b_1/b_2)$
AKUSTIKA:		
intensitāte	×	
jauda	×	
spiediens		×
daliņu kustība		×
ELEKTRĪBA:		
spriegums		×
strāva		×
jauda	×	



2.27. att. Sinusoidāla signāla mērījumi.

2.3. tabulā apkopots **10log** un **20log** izteiksmju lietojums.

Sinusoidāla signāla mērījumi. Sinusoidāls vilnis (sinusoīda) ir specifisks mainīga signāla veids un to apraksta ar tikai tam piederīgiem parametriem:

$$s(t) = A \sin(\omega t + \phi). \quad (2.36.1.)$$

Ja vērojam sinusoīdas attēlu osciloskopā, tad vienkāršākais nosakāmais parametrs ir signāla pīķis – pīķa vērtība. Signāls var būt gan spriegums, gan strāva, gan skaņas spiediens vai jebkas cits, ko attēlo sinusoīda (2.27. att.). Ja signāls ir simetrisks, tad U_{p-p} ir dubults U_p .

$$U_{\text{rms}} = \text{efektīvā vērtība} = \frac{U_p}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot U_p = 1,1 \cdot U_{\text{vid}}. \quad (2.37.)$$

$$U_{\text{vid}} = \frac{U_{\text{rms}} \cdot 2\sqrt{2}}{\pi} = \frac{U_{\text{rms}}}{1,1}. \quad (2.38.)$$

$$U_p = \sqrt{2} \cdot U_{\text{rms}} = 1,41 \cdot U_{\text{rms}} = 1,57 \cdot U_{\text{vid}}. \quad (2.39.)$$

$$C = \text{formas koeficients} = \text{crest factor} = \frac{U_p}{U_{\text{rms}}}. \quad (2.40.)$$

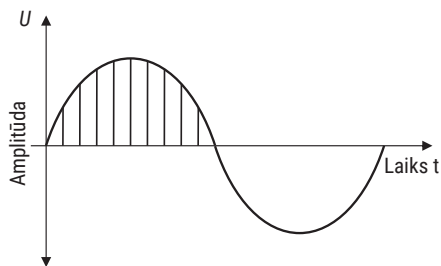
(formas koeficients sin signālam ir 1,414)

$$CdB = 20 \log \left(\frac{U_p}{U_{rms}} \right). \quad (2.41.)$$

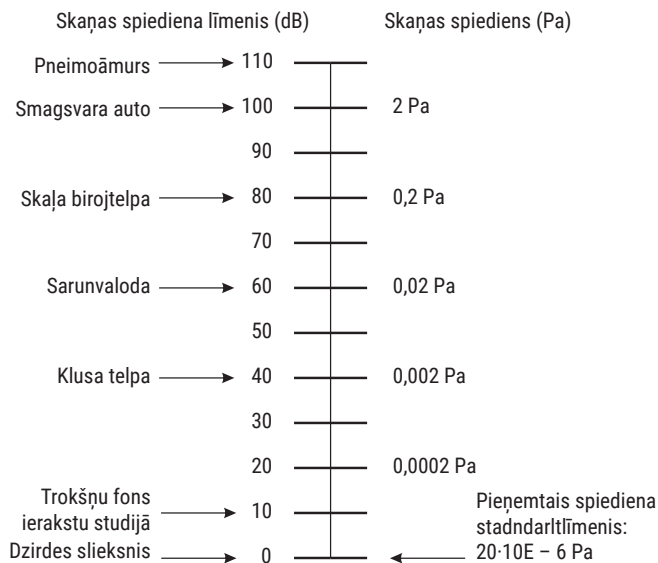
Patiesībā maiņsprieguma (maiņstrāvas) mērinstruments ir līdzsprieguma mērinstruments, kura ieejā ir diožu taisngriezis. Tas maiņspriegumu pārveido par pulsējošu līdzspriegumu, un iegūtā sprieguma vērtība atbilst U_{vid} .

Tomēr lielākā daļa mērinstrumentu ir kalibrēti **RMS** (*root mean square*) mērvienībās. Ja mērāmais signāls ir izteikti sinusoidāls, tad šāda fikcija ir pieņemama, pretējā gadījumā mērījums būs kļūdains. **1A** lielai maiņstrāvas efektīvajai I_{rms} vērtībai ekvivalenta ir siltumjauka, ko izdala rezistors ar definētu nominālu, ja caur to plūst **1A** liela līdzstrāva. Tātad maiņstrāva sasilda rezistoru jeb pastrādā darbu un nav svarīgi, kurā virzienā tā plūst.

Aplūkosim, kā tiek noteikta efektīvā vērtība (2.28. att.). Diskrētos laika momentos tiek veikts mērījums. Katrs no šiem mērījumiem tiek kāpināts kvadrātā, un tie visi tiek summēti. Vidējais lielums ir atrasts. No šī vidējā lieluma tiek izvilktā kvadrātsakne un tādējādi iegūts **RMS** mērījums pozitīvajam pusperiodam. To pašu var veikt attiecībā uz negatīvo pusperiodu, jo negatīvs



2.28. att. Efektīvās vērtības U_{rms} mērīšana.



2.29. att. Skaņas spiediena līmenis, spiediens un to izcelsmes avoti.

skaitlis kvadrātā ir pozitīvs lielums. Vienkāršāk ir dubultot pozitīva pusperioda vērtību, ja signāls ir simetrisks.

Tātad **RMS** lielumu jeb *siltumjaudu* var noteikt jebkuram mainīgam, periodiskam signālam, lai ko tas arī pārstāvētu, spriegumu, strāvu vai akustisko spiedienu.

Ar pazīstamu skaņas avotu palīdzību ir ilustrēti spiedienu līmeņi (2.29. att.).

1Pa lielam skaņas spiedienam atbilst **93,9794 dBSPL** (*Sound Pressure Level*).

2.7. SKAĻUMA LĪMENIS. SKAĻUMS, SKAĻUMS UN JOSLAS PLATUMS, TEMBRIS, RUNA, SKAŅAS AUGSTUMS UN INTERVĀLI, TOŅA VAI SKAŅAS FORMA, MUZIKĀLĀ SKALA

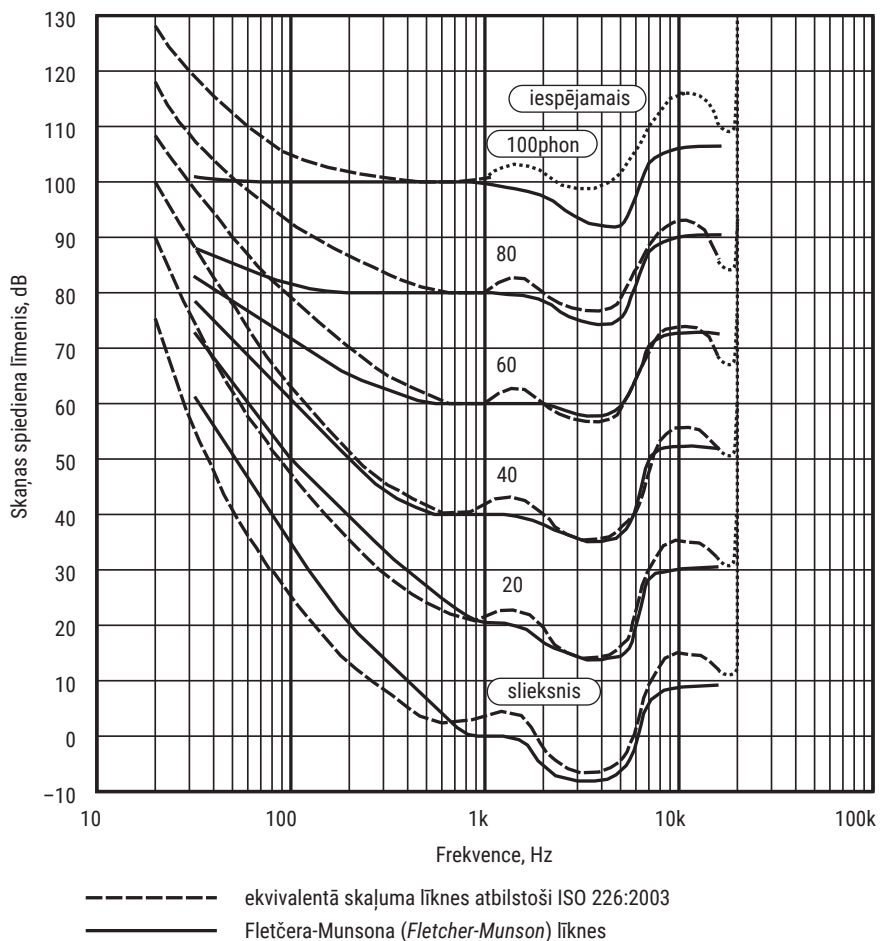
Skaļuma līmenis. Profesionālajā audiotehnikā pamatmērījums ir skaņas spiediena līmenis **L_p** (*sound pressure level*). Tas ir atšķirīgs no **L_w** (*sound power level*) un **L_i** (*sound intensity level*), un no citiem **L_x** mērījumiem, kas raksturo skaņas līmeni. Skaņas spiediena līmenis tiek mērīts tikai vienā punktā, tur, kur atrodas mikrofons.

Skaņas jaudas mērījumi aptver visu skaņas avota izstaroto skaņu. Skaņas intensitātes mērījumi aptver skaņas jaudas plūsmu caur virsmu.

Jaudas un intensitātes mērījumus lielākoties veic akustikas laboratorijās, retāk reālā vidē. Skaņas mērījumu dati prasti tiek apstrādāti tā, lai tie korelētu ar cilvēka dzirdes īpatnībām. Cilvēka dzirde nav vienlīdz jutīga pret visām frekvencēm. Tas sarežģī visu, jo mūsu reakcija un uzvedība ir atkarīga no (dzirdes) līmeņa. Dzirdes un frekvenču sakarības atspoguļo Fletčera-Mansona (*Fletcher-Munson*) līkņu saime – izofonas jeb skaļuma līmeņa līknes (2.30. att.), kas iegūtas, veicot lielu apjomu praktisku mērījumu.

Subjektīvi uztveramais skaņas skaļums ir atkarīgs no skaņas intensitātes, spektrālā sastāva, iedarbības ilguma, klausīšanās apstākļiem un, protams, no paša klausītāja. Subjektīvi raksturojošo skaļuma lielumu sauc par skaļuma līmeni un tā mērvienība ir *fons* (*phon*). Šo mērvienību nelieto SI sistēmā, bet gan Amerikas Nacionālais standartu institūts (*American National Standards Institute*). Tās pamatā ir skaļuma logaritmiskā uztvere un decibelu skala.

Skaļuma līmeni nosaka, subjektīvi salīdzinot dotās skaņas skaļumu ar **1000 Hz** sinusoidāla etalontona skaļumu. Ja abu skaņu skaļumi šķiet vienādi, par fonos izteiktu dotās skaņas skaļuma līmeni sauc atbilstošā etalontona skaņas līmeni, kas izteikts decibelos attiecībā pret nulles līmeni pie spiediena $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} = 20 \mu\text{Pa}$.



2.30. att. Fletčera-Munsona vienāda skaļuma līknes – izofonas.

Sinusoidālam tonim ar frekvenci **1000 Hz** fonu skaits sakrīt ar decibelu skaitu. 2.30. att. redzams, ka vienādiem skaņas spiediena līmeņiem pie dažādām frekvencēm ir dažādi skaļuma līmeņi.

Piemēram, tonis ar spiediena līmeni **60 dB** pie **1000 Hz** frekvences ir ar skaļuma līmeni **60 foni**, bet pie **100 Hz** skaļuma līmenis ir **40 foni**. Ja kopējo skaņas līmeni pazemina par noteiktu decibelu skaitu, piemēram, par **20 dB**, tad skaļuma līmenis abiem toņiem mainīsies dažādi: pie **1000 Hz** par **20 foniem**, bet pie **100 Hz** par **50 foniem**. Tātad no frekvences neatkarīgas skaņas līmeņa maiņa ir saistīta ar zemo un augsto toņu līdzsvara maiņu.

Tiek lietoti arī t.s. *fizioloģiskie* skaļuma regulatori, ar kuriem, mainot skaņas skaļuma līmeni, tiek koriģēta arī amplitūdas frekvenču raksturliktne. Domas

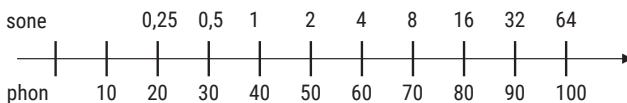
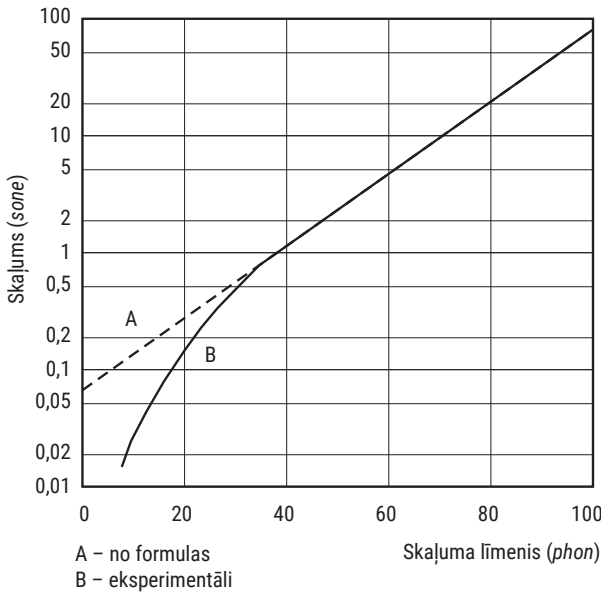
dalās par šāda risinājuma lietojumu. Skaņa tiek kropļota frekvenču diapazonā zem 1 kHz un pie maziem līmeņiem.

Skaļums. Lai pilnīgāk raksturotu skaņas subjektīvi uztveramo skaļumu, nepieciešams izraudzīties tādu mērlielumu, kas iespējami daudzveidīgos apstākļos būtu proporcionāls subjektīvam skaļumam. Šādu mērlielumu sauc par skaļumu un apzīmē ar S , tā mērvienība ir *sons* (*sone*).

Skaļuma izjūta nav logaritmiska, tāpēc fonu skala skaļuma izmaiņas neraksturo pareizi. Daudzu zinātnieku (Fletčera, Mansona, Stīvensa, Dēvisa u.c.) pētījumu rezultāti rāda, ka skaļums S ir skaņas spiediena p pakāpes funkcija $S = \text{const} \cdot p^{\gamma}$; (soni)

Ir noskaidrots, ka samērā plašā frekvenču un skaļuma diapazonā pakāpes rādītājs γ ir gandrīz nemainīgs un aptuveni vienāds ar **0,6**. Konstanti formulā izvēlas ar tādu apsvērumu, lai vidēji klusas skaņas skaļums (*ar līmeni apmēram 40 foni*) veidotu vienu skaļuma vienību – sonu. Balstoties uz šiem pieņēmumiem, sakarību starp skaļumu S un skaļuma līmeni L_p var izteikt šādi:

$$S = \frac{2(L_p - 40)}{L_{10}} \quad (2.42.)$$



2.31. att. Sakarība starp skaļuma līmeni un skaļumu pie 1000 Hz frekvences.

2.4. tabula

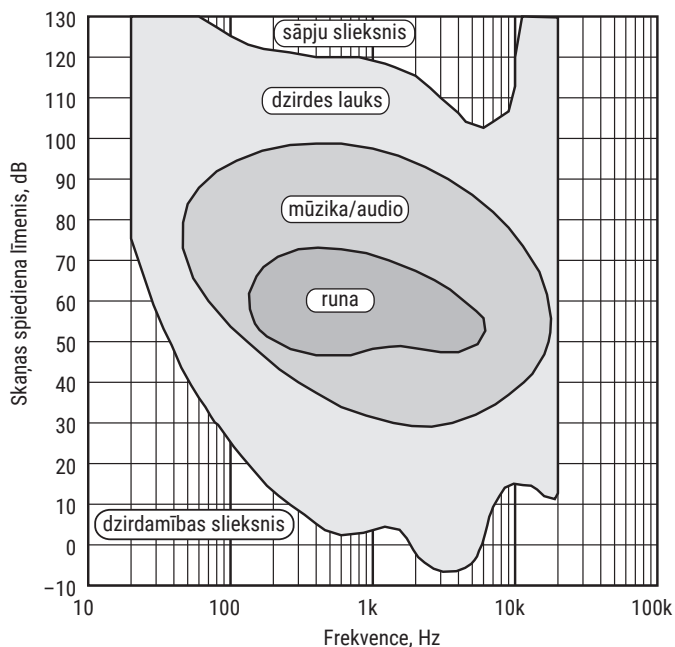
Skaļuma līmenis (<i>phon</i>)	Subjektīvais skaļums (<i>sones</i>)	Skaņas avots
100	64	Brauc kravas automobilis
80	16	Skaļa runa
60	4	Klusa runa
40	1	Klusa istaba
20	0,25	Izcili klusa ierakstu studija

Kā redzams, skaļuma līmeņa pieaugums par 10 foniem palielina skaļumu divas reizes. Formula ir gana laba praktiskām vajadzībām. Novirzes ir novērojamas tikai pie maziem līmeņiem (2.31. att.).

Subjektīva skaļuma mērvienībai ir arī tīri praktiski lietojumi. Piemēram, kāds Vecrīgas iedzīvotājs ir sašutis par lielo troksni kaimiņos esošajā alus dārzā. Lieta nonāk pat līdz tiesai. Tiek pieaicināts eksperts. Viņš veic trokšņu mērījumus ar 1/3 oktāvas filtru. Izsaka katras joslas skaņas spiediena līmeņa mērījumus skaļuma mērvienībās – sonos (2.31. att.). Summējot visu joslu skaļumu, iegūst skaļuma līmeni – bilanci.

Veicot testus ar apmācītu klausītāju dalību, ir iegūti šādi rezultāti (2.32. att.).

Pētījuma eksperimenta laikā klausītāji atrodas ar skatu pret skaņas avotu un cenšas saklausīt noteiktas frekvences toņa parādīšanos (dzirdamības



2.32. att. Cilvēka dzirdes lauks.

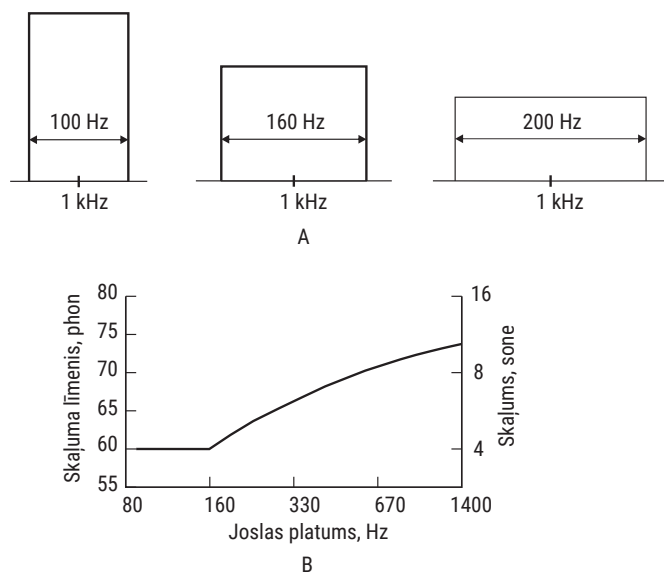
sliksnis) vai arī ziņo par sāpju izjūtas parādīšanos ausīs (sāpju sliksnis). Tādā veidā tiek noteikts apakšējais un augšējais dzirdamības sliksnis. Kā redzams, šīs dzirdamības līknes ir atkarīgas no frekvences. Lielākā daļa mūzikas nepārsniedz **75 dBx(50 Hz–8,5 kHz)** diapazonā no visklusākās līdz visskaļākajai. Līdzīgi ir, arī atskaņojot ierakstus. Frekvenču diapazons nepārsniedz **18 kHz**. Runas lauka parametri ir aptuveni **42 dBx(170–4000 Hz)**.

Skaļums un joslas platums. Līdz šim tika runāts par vienas frekvences toni, taču tonis nespēja sniegt visu nepieciešamo informāciju, lai subjektīvo skaļuma izjūtu varētu sasaistīt ar mērinstrumenta rādījumiem.

Piemēram, lidaparāta pacelšanās troksnis izklausās daudz skaļāk nekā tonis ar tādu pat skaņas spiediena līmeni. Trokšņa joslas platums noteiktās robežās ietekmē skaņas skaļumu.

Ņemsim trīs skaņas (2.33 att. a). Tām visām ir vienāds **60 dB** skaņas spiediena līmenis, bet joslu platums ir attiecīgi **100 Hz**, **160 Hz** un **200 Hz**. Figūru augstums ir mainīgs un attēlo skaņas intensitāti uz Hz. Visu trīs figūru laukumi (kvadrātūra) ir vienādi. Citiem vārdiem sakot, visām skaņām ir vienāda intensitāte. Skaņas intensitātei ir īpaša nozīme akustikā un tā nav pielīdzināma skaņas spiedienam. Visām trīs skaņām (2.28. att. a) nav identisks skaļums.

Eksperimentāli ir iegūta līkne (2.33. att. b), kas parāda, kā troksnis ar **60 dB** konstantu spiediena līmeni, centrālo frekvenci **1 kHz**, bet mainīgu joslas platumu, ietekmē skaļumu. Troksnim ar **100 Hz** platu joslu atbilst skaļuma līmenis **60 foni** un skaļums **4 soni**. Troksnim ar **160 Hz** platu joslu atbilst tas pats skaļuma līmenis un skaļums.



2.33. att. Joslas platuma ietekme uz skaļumu.

Izmaiņas sākas, ja joslas platums kļūst lielāks par **160 Hz**. Joslas platumam pieaugot, pieaug arī skaļums. Kāpēc tādas izmaiņas, joslas platumam pieaugot virs **160 Hz**? Tās ir saistītas ar cilvēka auss īpatnībām. **160 Hz** plata josla ar centrālo frekvenci **1 kHz** ir kritiskais punkts. Ja tiek atskaņots **1 kHz** tonis kopā ar troksni **160 Hz** joslā, tad troksnis efektīvi nomaskē toni. Svarīgs ir arī skaļums. Šajā gadījumā cilvēka auss (dzirde) uzvedas (strādā) kā analizators, kas ir izveidots no daudziem joslu filtriem dzirdamības spektrā.

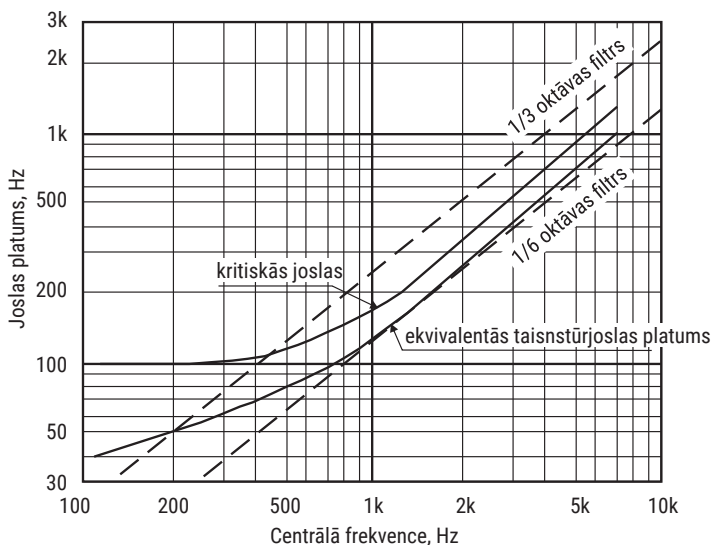
Šis *filtru komplekts* atšķiras no tiem, kurus lieto elektronikas laboratorijās. Laboratorijās lietotie 1/3 oktāvas filtri sastāv no blakus novietotiem **28** joslu filtriem, kuri pārklājas **-3 dB** līmenī. Auss *analizators* nav ar fiksētu skaitu joslu filtriem. Nav svarīgi, kāda frekvence ir izvēlēta, svarīgs ir kritiskais joslas platums šai frekvencei. Pētījums parāda, kā savstarpēji ir saistīta frekvence un kritiskais joslas platums. Joslas platumas funkcija ir attēlota 2.34. attēlā.

Kritiskās joslas kļūst platākas, pieaugot frekvencei. Ir arī citas metodes, lai noteiktu kritiskos joslu platumus; tās piedāvā dažādus novērtējumus, īpaši frekvenču diapazonā zem **500 Hz**. Piemēram, ekvivalentā taisnstūrjoslas platumas (*Equivalent Rectangular Bandwidth – ERB*) metode. Tās pamatā ir matemātiski aprēķini un to lieto, strādājot ar gados jauniem klausītājiem pie mērena skaņas līmeņa. *ERB* aprēķiniem piedāvā vienkāršu formulu:

$$ERB = 6,23 \cdot f^2 + 93,3 \cdot f + 28,52 \text{ (Hz)}, \quad (2.42.)$$

kur f – frekvence, Hz.

1/3 oktāvas filtru komplekta joslu platumi ir tuvi cilvēka auss kritiskajām joslām. Šiem filtriem josla ir **23,2 %** no centrālās frekvences. Kritiskās joslas platums ir **17 %** no centrālās frekvences. *ERB* joslas platums ir ap **12 %**, kas ir



2.34. att. Joslas platumas funkcija.

tuvs **1/6** oktāvas filtram – **11,6 %**. Kritiskās joslas ir svarīgas dažādos audio skaņas lietojumos.

Piemēram, tādos digitalizētās skaņas formātos, kā MP3, AAC tiek izmantots maskēšanas princips. Tonis (muzikālie signāli) maskē kvantēšanas troksni, kas atrodas kritiskajās centrālo frekvenču joslās. Tomēr, ja kvantēšanas troksnis iziet ārpus kritiskajām joslām, tonis to nespēj nomaskēt. Skaņas digitalizācijas procesā trokšņus kritiskajās joslās mēģina nomaskēt ar skaļāku toni.

Vienas kritiskās joslas platums atbilst 1barkam. Mērvienības nosaukums ir par godu vācu fiziķim Heinriham Barkhauzenam (*Heinrich Barkhausen*).

Tembrs. Tembrs raksturo saliktas skaņas tonālo uztveri mūsu dzirdes sistēmā. Šo terminu galvenokārt lieto, lai raksturotu mūzikas instrumentu skaņu. Flauta un klarnete skanēs atšķirīgi, atskaņojot vienas un tās pašas frekvences toni. Katram mūzikas instrumentam ir savs tembrs, to raksturo virstoņu klātesamība un lielums.

Tembrs ir subjektīvs lielums, tā tuvs fizikālais analogs ir spektrs. Mūzikas instruments atskaņo pamattoni un virstoņus – harmonikas. To visu var redzēt un analizēt ar spektra analizatora palīdzību.

Piemēram, ja pamattonis ir **200 Hz**, tad pirmā harmonika ir **400 Hz**, otrā **600 Hz** utt. Subjektīvais tonis, ar kuru dzirdei saistās nomērītie **200 Hz**, nedaudz mainās atkarībā no skaņas līmeņa.

Auss veic savu, pie tam sarežģītu, subjektīvo harmoniku analīzi. Rezultāts ir tāds, ka dažādu instrumentu viena toņa tembrs dzirdei ir atšķirīgs no spektra mērījumiem. Tembrs (subjektīvs lielums) un spektrs (objektīvs lielums) nav identiski.

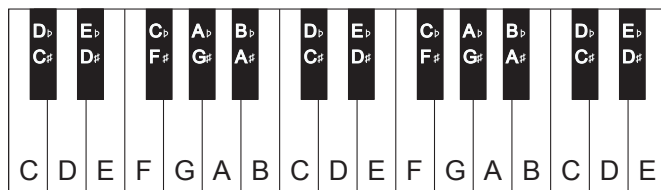
Zemo frekvenču diapazonā tembra veidošanā piedalās līdz pat **20** un vairāk virstoņu. Praksē mēdz runāt par *siltu* toni. Vidējo frekvenču diapazonā dalību ņem **8–10** virstoņi. Trūcīgāk ir augsto frekvenču diapazonā. Tur ir **2–3** virstoņi. Tas saistīts ar skaņas līmeni un ultraskaņas diapazonu, kur *iekrīt* augstākie virstoņi, kurus cilvēka auss netver.

Runa. Skaņas augsto toņu dzirdamība ir būtiska runai un valodai. Spēja dzirdēt runas augstos toņus ir svarīga, lai varētu saprast runātāju. Tas ir tikpat svarīgi, kā zināt valodas uzbūves sakarības un gramatikas likumus.

Runas saprotamībai svarīgas ir tādas skaņas kā, piemēram, *k, f, s*. Tās atrodas frekvenču apgalā starp **3 kHz** un **8 kHz**, un tām ir zems intensitātes līmenis.

Patskaņi *a, u, i* atrodas zemo frekvenču apgalā un ir gana intensīvi. Patskaņi ir *atbildīgi* par runas dzirdamību.

Ar artikulāciju raksturo pārraidītās runas teksta saprotamību. Izšķir burtkopu, vārdu un teikumu artikulāciju. Artikulācijas pārbaudes testa laikā diktors lasa savstarpēji nesaistītas burtkopas, vārdus vai teikumus no speciālām tabulām. Dzirdētais tiek pierakstīts, pēc tam pareizi uztverto attiecina pret kopējo nolasīto un iegūst artikulācijas līmeni. Artikulācija ir komplekss lielums, ja tā var teikt, jo to ietekmē orators, telpa, aparatūra.



2.35. att. Klaviatūra un nošu apzīmējumi.

Skaņas augstums un intervāli. Parādieties pirmajiem mūzikas instrumentiem, kuri jau atšķirās no divām koka vālītēm, tika apzināta skaņu rinda jeb skaņu daudzums un to savstarpējās attiecības.

Laika gaitā, attīstoties instrumentiem no vienkāršas uz daudzstīgu, muzicējot vairākiem instrumentiem kopā, dziedot daudz balsīgi, attīstījās arī skaņu rinda. Tās attīstību ir veicinājis arī Pitagors.

Periodisku skaņas signālu, gan sinusoidālu, gan sastāvošu no harmonikām, klausītājs uztver kā muzikālu toni ar tam piemītošu noteiktu *augstumu*.

Ja divi muzikāli toņi skan vienlaikus, to augstuma atšķirību nosaka muzikālais intervāls, t.i., attālums starp notīm (2.35. att.). Vienādu intervālu iespaidu rada vienādas toņu pamatsvārstību frekvenču attiecības neatkarīgi no pašu frekvenču absolūtā lieluma. Tāpēc par skaņas harmonisko augstumu sauc tās pamattoņa frekvenci, izteiktu Hz.

Subjektīvi saderīgu skanējumu dod toņi, kuru frekvences veido samērā vienkāršas veselu skaitļu attiecības. Uz šī pamata ir izveidota dabiskā muzikālā toņkārtā, sastāvoša no **12** toņiem – notīm (2.5. tab.). Piemērs ir izvietots pirmajā oktāvā.

2.5. tabula

Tonis*	Apzīmējums	Intervāls no Do ¹	Attiecība $f:f^d$ dabiskā toņkārtā	Frekvence f (Hz)
Do ¹	C ¹	Prima (unisons)	1:1 = 1,000	264 = fd
Do ^{diezs}	C ^{diezs}	Hromatiskais pustonis	25:24 = 1,042	275
Re	D	Sekunda	9:8 = 1,125	297
Re ^{diezs}	D ^{diezs}	Palielinātā sekunda	75:64 = 1,172	309,38
Mi	E	Terca	5:4 = 1,250	330
Fa	F	Kvarta	4:3 = 1,333	352
Fa ^{diezs}	F ^{diezs}	Palielinātā kvarta	25:18 = 1,389	366,67
Sol	G	Kvinta	3:2 = 1,500	396
Sol ^{diezs}	G ^{diezs}	Palielinātā kvinta	25:16 = 1,562	412,5
La	A	Seksta	5:3 = 1,667	440
La ^{diezs}	A ^{diezs}	Palielinātā seksta	125:72 = 1,736	458,33
Si	B	Septīma	15:8 = 1,875	495
Do ²	C ²	Oktāva	2:1 = 2,000	528

* tabulā nav bemolu.

No tabulā uzrādītajām frekvenču attiecībām dabiskajā toņkārtā labu skaņējumu dod kvinta **Do-Sol** ar frekvenču attiecību **2:3**. Kvintas intervālus veido arī toņi **Mi-Si** (2:3) un **Re-La**, tikai pēdējā gadījumā frekvenču attiecība ir **27:40**, kas rada apmēram **1,3 %** lielu kļūdu. Līdzīgas kļūdas piemīt arī citiem intervāliem. Minētais dabiskās toņkārtas trūkums ir novērsts t.s. vienmērīgi temperētajā jeb vienkārši temperētajā toņkārtā, 2.6. tabulā, kurā ir paredzēts, ka oktāva sadalās **12** vienādos pustoņos. Katras nākamās nots augstumu attiecībā pret iepriekšējo nosaka sakarība:

$${}^{12}\sqrt{2}:1, \quad (2.43.)$$

kur $\sqrt{2} = 1,05947$.

Starpība starp noti un tās paaugstinājumu par pustomi, ir **100 centi**.

1 cents ir attiecība ${}^{1200}\sqrt{2}:1$.

Iegūtie skaitļi ar diezgan lielu precizitāti līdzinās dabiskās toņkārtas frekvenču attiecību daļskaitļiem. Piemēram, temperētajai kvintai:

$${}^{12}\sqrt{2^7} = 1,498307 \text{ atšķiras no } 1,5 \text{ tikai par } 0,11 \text{ \%}.$$

Temperētā toņkārtā dod iespēju ikvienu intervālu veidot no jebkura toņa, turklāt visi vienāda nosaukuma intervāli un pat daudzi dažāda nosaukuma intervāli (piemēram, palielinātā kvinta un mazā seksta) skan vienādi. Temperētās toņkārtas struktūra labāk izprotama, iedziļinoties tabulas saturā. Nemuzikālajā pasaulē lietotie frekvenču intervāli ir oktāva (frekvenču attiecība 1:2):

2.6. tabula

tonis*	apzīmējums	intervāls no Do ¹	attiecība $f:f'$ temperētā toņkārtā	frekvence f (Hz)	centi
Do ¹	C ¹	Prima (unisons)	$2^0 = 1,000$	$261,63 = f'$	0
Do ^{diezs}	C ^{diezs}	Hromatiskais pustomis	$2^{1/12} = 1,059$	277,18	100
Re	D	Sekunda	$2^{2/12} = 1,122$	293,66	200
Re ^{diezs}	D ^{diezs}	Palielinātā sekunda	$2^{3/12} = 1,189$	311,13	300
Mi	E	Terca	$= 1,260$	329,63	400
Fa	F	Kvarta	$= 1,335$	349,23	500
Fa ^{diezs}	F ^{diezs}	Palielinātā kvarta	$= 1,414$	366,67	600
Sol	G	Kvinta	$= 1,587$	369,99	700
Sol ^{diezs}	G ^{diezs}	Palielinātā kvinta	$= 1,562$	415,30	800
La	A	Seksta	$= 1,685$	440	900
La ^{diezs}	A ^{diezs}	Palielinātā seksta	$2^{10/12} = 1,782$	466,16	1000
Si	B	Septīma	$2^{11/12} = 1,883$	493,88	1100
Do ²	C ²	Oktāva	$2^{12/12} = 2,000$	523,25	1200

* tabulā nav bemolu.

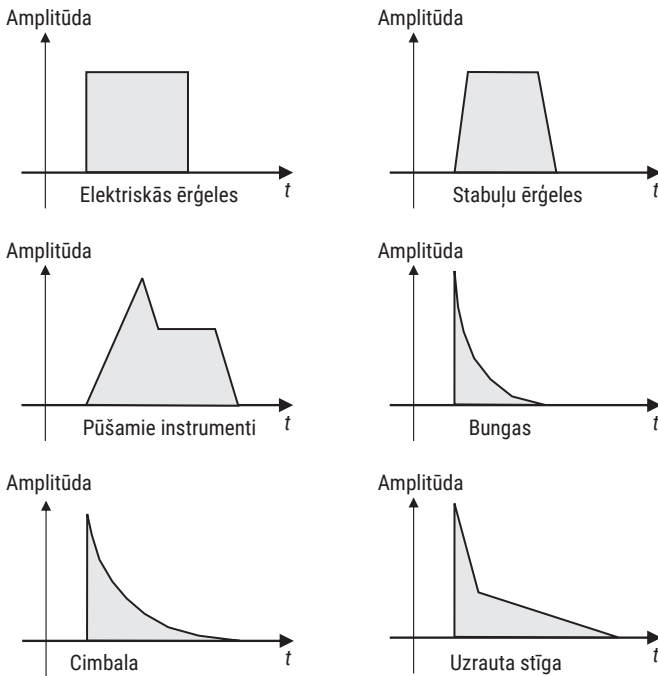
pusoktāva $^{12}\sqrt{2^6}$, kas atbilst temperētajai pamazinātajai kvintai);

trešdaļoktāva $^{12}\sqrt{2^3}$, kas atbilst temperētajai tercai.

Tāpat kā audiotehnikā, kur atbalsta lielumi ir, piemēram, **1000 Hz, dBV, dBm** līmenis utt., arī mūzikā ir tāds. Tā ir **440 Hz** frekvence jeb 1. oktāvas nots **La**, kuru pieņemts apzīmēt arī ar **A4**. Attiecībā pret to var veidot visus citus toņus un noskaņot (sinhronizēt) orķestra instrumentus. Ierīce jeb etalonģenerators ir kamertonis (2.36. att.).



2.36. att. Kamertonis.



2.37. att. Dažādu mūzikas instrumentu apliecošās līknes.

Vidējo frekvenču apgabalā no **500 Hz** līdz **4000 Hz** auss pret toņu izmaiņām ir visjutīgākā. Tā spēj izšķirt pat **0,2 %** frekvences *aizpeldēšanu*. Abpus norādītajām robežām frekvences izmaiņa ir mazāk jūtama.

Šis apstāklis ir strikti jāņem vērā, projektējot mūzikas atskaņošanas ierīces, kurās nesēja mehāniskā kustība ir rotācija, piemēram, skaņu plašu atskaņotāji, CD atskaņotāji vai lenšu magnetofoni. Apgriezienu stabilitātei ir jābūt vismaz par kārtu augstākai.

Toņa vai skaņas forma. Katrai skaņai ir sākums, vidusdaļa un beigas. Visas skaņas ir laikā mainīgas. To izmaiņas laikā apraksta apliecošā līkne – amplitūdas forma. Sauksim to par apliecošo (*envelope*). Dažādām skaņām ir atšķirīga apliecošā. To dažādā forma veido dažādu skanējumu. Sekojošajā zīmējumā (2.37. att.) redzamas dažādu mūzikas instrumentu apliecošās.

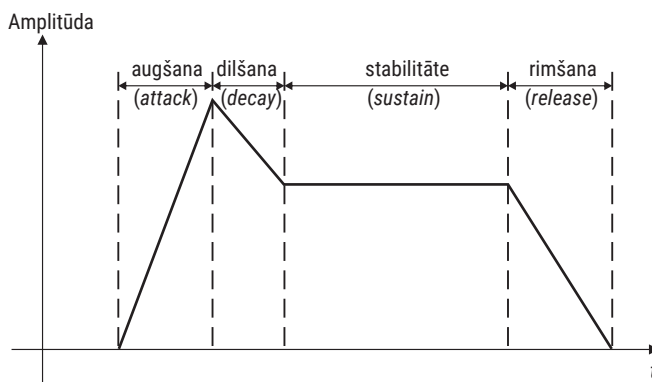
Lai analizētu apliecošo līkni, sadalīsim to saprotamos un grafiski skatāmos posmos:

Elektroakustikas pasaulē šo posmu kopumu pieņemts apzīmēt ar **ADSR**.

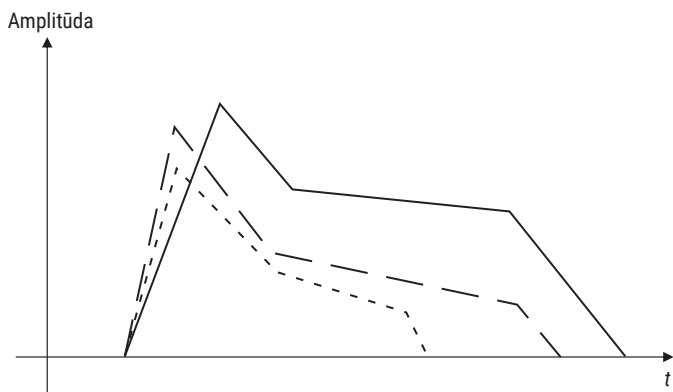
Tiek piedāvāts latviešu valodas variants, kā šos posmus nosaukt, saglabājot starptautisko abreviatūru:

- **Attack** (augšana) – ātrums, ar kādu skaņa pieaug līdz izvēlētajam līmenim.
- **Decay** (dīlšana) – laiks, kurā skaņa samazinās, sasniedzot noturīgi nemainīgu līmeni, bet ne nulles līmeni.
- **Sustain** (stabilitāte) – laiks, kurā skaņas līmenis ir nemainīgi noturīgs.
- **Release** (rimšana) – laiks, kurā skaņas līmenis samazinās līdz dzirdamības sliekšnim.

Katra skaņa satur šos posmus, bet to proporcijas var būt dažādas, taču ne visām skaņām ir visi četri posmi. Būtiskākie ir augšana un stabilitāte.



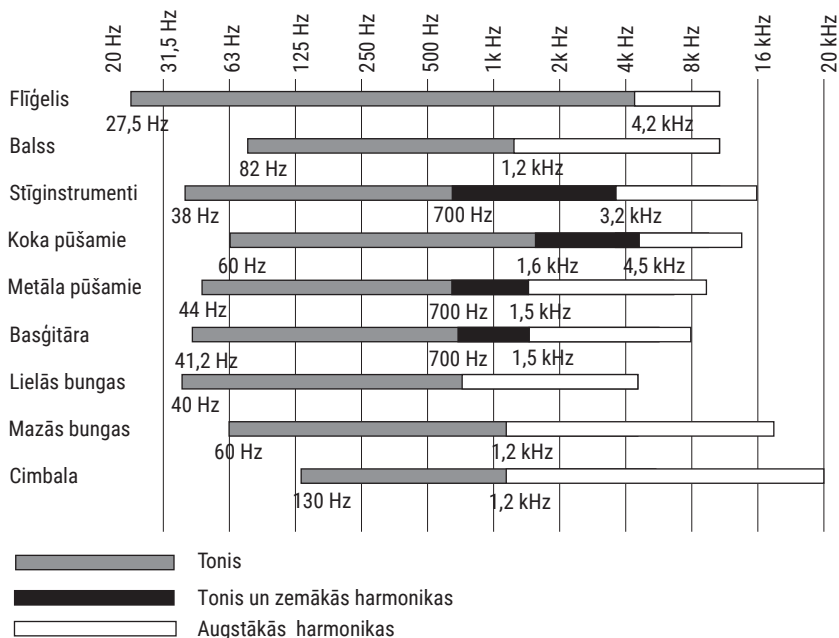
2.38. att. Apliecošās līknes posmi.



2.39. att. Salikta periodiska signāla pirmo trīs harmoniku apliecošās līknes.

Augšana var būt gan ātra, gan lēna (stāva vai lēzena). Augšanas ātrums ir svarīgākais parametrs mūsu smadzenēm, atpazīstot skaņu. Tas ir saistīts ar skaņas tembru.

Tā kā skaņa satur harmonikas (2.39. att.), tad to apliecošās augšanas laikā mainās strauji. Mūsu dzirde un visi pārējie sensori vispirms reaģē uz



2.40. att. Dažādu mūzikas instrumentu frekvenču un to harmoniku diapazoni.

pieaugumu un tikai tad uz noturīgo līmeni, līdz ar to šai pirmajā signāla frontē ir ļoti daudz informācijas mūsu dzirdei.

Ir veikts interesants eksperiments. Proti, viena instrumenta augšana tiek samiksēta ar dažādu citu instrumentu stabilitāti. Atskaņojot šīs sintezētās skaņas, tās izklausās ļoti līdzīgas un netrenētam klausītājam ir grūti identificēt atšķirības.

Jebkuru periodisku skaņu var raksturot ar frekvenci un ar pamatfrekvences un harmoniku amplitūdu. Tātad jebkuras periodiskas svārstības var rekonstruēt, izmantojot atbilstošas harmoniskās svārstības un piemērotus to līmeņus.

Tā ir adaptīvās jeb Furjē sintēzes metodes būtība. Šo sintēzes principu plaši izmanto mūsdienu elektroniskajos mūzikas instrumentos – sintezatoros – un ne tikai. Šajos mūzikas instrumentos ir liels skaits regulējamu oscilatoru, kuri veido nepieciešamās harmonikas, un pārskatāms apliecošās ģenerators, kas veido atbilstošu **ADSR** līkni.

Mūsdienu elektroniskā audio aparatūra ļauj ierakstīto skaņu atskaņot pretējā virzienā, tad apliecošā iegūst spoguļattēlu. Skaņa sākas ar rimšanu un beidzas ar augšanu. Parādās dažādi sintezēti skanējumi, kādi nav sastopami esošajiem dabiskajiem pūšamajiem, stīgu un sitamajiem instrumentiem. Top jauni instrumenti – elektroniskie instrumenti.

Muzikālā skala. 2.40. attēlā parādīti dažādu mūzikas instrumentu frekvenču un harmoniku diapazoni, kuri noteic, kā cilvēka dzirde identificē katru no tiem.



ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅAM

1. Ko spiediena izmaiņas vai svārstības izraisa homogēnā vidē?
2. Kādas svārstības ģenerē aktivizēts atsperē iekārts atsvars?
3. Kas ir svārstību cikls?
4. Ko sauc par akustisko lauku?
5. Kāpēc izkustināta gaisa daļiņa neatgriežas sākumstāvoklī momentāni?
6. Kā izplatīsies skaņa vidēs ar atšķirīgu blīvumu?
7. Ar kādu ātrumu izplatīsies skaņa bezgaisa telpā?
8. Vai skaņas ātrums un vides daļiņu ātrums ir vienādi?
9. Nosauciet pazīstamākās viļņu svārstību formas un kur tās sastopamas dabā?
10. Kas ir skaņas intensitāte?
11. Kāda matemātiska sakarība raksturo skaņas intensitāti un attālumu?
12. Kā izplatās skaņa?
13. Cik liels ir starptautiski pieņemtais zemākais dzirdamās skaņas spiediena līmenis?
14. Cik liels ir skaņas ātrums normālapstākļos?
15. Kas ir Maha (*Mach*) skaitlis?
16. Kā vienkāršoti aprēķināt zibens spēriena vietas attālumu?
17. Kāda ir spiediena mērvienība?
18. No kuras puses pieņemtajam audiofrekvenču diapazonam pieļaujamas ultra-skaņas diapazons?
19. Kādus viļņus sauc par saliktiem viļņiem?
20. Kas ir harmonikas un kā tās noteikt, ja zināms pamattonis?
21. Kas ir viļņu fāze un kā to mēra?
22. Vai varat nosaukt zinātnieka uzvārdu saistībā ar saliktiem viļņiem?
23. Kas ir skaņas oktāva un kāds ir tās matemātiskais vienādojums?
24. Kādas ir akustisko mērījumu oktāvu skalas?
25. Kādas skalas jūs zināt akustisko līmeņu mērītājiem un ar ko tās raksturojas?
26. Ar ko atšķiras vienādas frekvences sinusoidālas, trīsstūrveida un taisnstūrveida formas signāli?
27. Ar ko raksturojas baltais troksnis un rozā troksnis un to lietojums?
28. Kādi skaņas spiediena mērīšanas paņēmieni ir zināmi?
29. Kāda ir skaņas spiediena mērvienība elektroakustikā?
30. Kāpēc starptautiski pieņemtais skaņas dzirdamības sliekšnis ir tāds, kāds tas ir?
31. Cik liela ir starptautiski pieņemtā nulles līmeņa jauda?
31. Ko nozīmē mērījuma mērvienība dBm?
32. Ko akustikā un elektrotehnikā skaitļo ar $10 \log_{10} \left(\frac{x_1}{x_2} \right)$ un ko ar $20 \log_{10} \left(\frac{y_1}{y_2} \right)$?

33. Grafiski attēlot sinusoidāla signāla U_p , U_{pp} , U_{RMS} , U_{vid} mērījumu līmeņus un uzrakstīt savstarpējās matemātiskās sakarības.
34. Cik lielam skaņas spiediena līmenim atbilst 1Pa liels skaņas spiediens?
35. Kas ir izofonas?
36. Kāda ir skaļuma līmeņa mērvienība?
37. Kas ir skaļums un kāda ir tā mērvienība?
38. Kā eksperimentāli noteikt cilvēka dzirdes lauku?
39. Kā mijiedarbojas skaļums u joslas platums?
40. Ko raksturo tembrs?
41. Kāda ir līdzskaņu un patskaņu loma mūsu dzirdei?
42. Ko nosaka muzikālais intervāls?
43. Kāda ir muzikālās pasaules bāzes frekvence un kas tā par noti?
44. Kāda ierīce ģenerē bāzes frekvenci?
45. Cik nošu ir muzikālajā oktāvā?
46. Vai varat nosaukt Do mažora trīsskani?
47. Kāpēc ir svarīgi, lai plašu atskaņotājam būtu stabili apgriezieni?
48. Kas ir apliecošā un ko tā raksturo?
49. Ko nozīmē vārds *sintēze* kontekstā ar mūsdienu elektroniskajiem mūzikas instrumentiem?
50. Ko raksturo mūzikas instrumentu muzikālā skala?

SKAŅA ATKLĀTĀ ' LAUKĀ



03

- 3.1. Brīvais lauks
- 3.2. Skaņas izplatība – diverģence
- 3.3. Skaņas intensitāte brīvā laukā
- 3.4. Skaņas spiediens brīvā laukā
- 3.5. Brīvā lauka skaņas diverģence



Atmiņas un prāta treniņam

Daudzas akustikas problēmas, piemēram, atstarošanās, absorbcija, reverberācija, difrakcija, ir nemainīgi saistītas ar telpām, būvēm, ar transportlīdzekļiem un to trokšņiem. Vispār tās jau varētu būt klasificētas kā fizikas problēmas, jo tās ir ļoti sarežģītas, aplūkojot no fizikas procesu viedokļa.

Piemēram, skaņas lauks var sastāvēt no tūkstošiem atstarotām komponentēm – skaņas viļņiem, temperatūras gradients var ietekmēt skaņas vilni visneprognozējamākajā veidā.

Ja ar skaņu saistītos procesus aplūkojam atklātā laukā, tad skaņas uzvedība ir ļoti prognozējama, un analīzes process kļūst daudz vienkāršāks un dati ticamāki. Analīzes dati ļauj izprast skaņas viļņu dabu un turpmāk tie ir lietojami, risinot sarežģītus uzdevumus.

Izvērstāka informācija par definīcijām, mērījumu metodiku un citām lietām ir gūstama, iepazīstoties, piemēram, ar starptautisko standartu **ISO 12001**.

3.1. BRĪVAIS LAUKS

Pieņemsim, ka brīvais lauks ir atklāta telpa. Skaņa brīvā laukā netraucēti izplatās taisnā virzienā. To nekas neietekmē. Skaņas izplatību neietekmē daudzas ārējas iedarbes, kuras tiks aplūkotas turpmākā izklāstā. Skaņa brīvā laukā netiek atstarota un novirzīta. Tur nav difrakcijas, refrakcijas un difūzijas, nav arī rezonanses. Praksē lielākoties visi šie faktori iedarbojas uz skaņas viļņiem, kolīdz tie atstāj skaņas avotu.

Nosacīti brīvais lauks ir bezatbalss kamera – telpa, kur visas virsmas ir pārklātas ar skaņu absorbējošu materiālu. Tāpat nosacīti brīvais lauks eksistē cieši pie skaņas avota. Kopumā brīvais lauks ir teorētiski pieņemts, un tajā skaņa izplatās bez interferences.

Brīvo lauku nevajag saistīt ar kosmisko telpu. Skaņas viļņi nevar izplatīties vakuumā. Tiem vajag vidi, piemēram, gaisu.

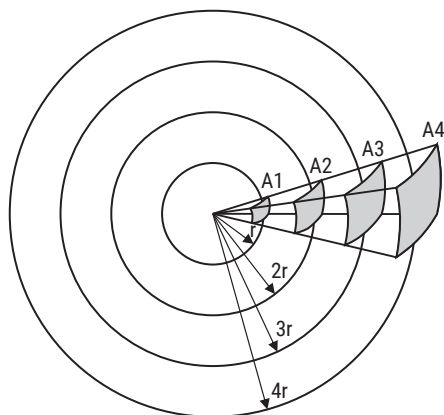
Tātad brīva telpa nozīmē gaisa telpu, kurā ir iedomāts teorētiski brīvais skaņas lauks. Tā ir unikāla vide, kurā mums būs jāpēta, kā skaņa izplatīsies (divergēs) no avota un kā mainīsies tās intensitāte, attālinoties no avota.

3.2. SKAŅAS IZPLATĪBA – DIVERĢENCE

Pieņemam, ka mūsu rīcībā ir punktveida skaņas avots, kas izstaro skaņu ar fiksēti nemainīgu jaudu fiksētā leņķī (3.1. att).

Skaņas avotu var uzskatīt par punktveida, ja tā vislielākā dimensija ir salīdzinoši maza salīdzinājumā ar attālumu, kurā tiek veikti mērījumi.

Piemēram, ja avota lielākā dimensija ir **0,33 m**, veicot mērījumus **2 m** attālumā un tālāk, šo avotu var uzskatīt par punktveida.



3.1. att. Skaņas izplatība sfērā.

Tātad, jo lielākā attālumā tiek veikti mērījumi, jo vairāk skaņas avots ir uzskatāms par punktveida. Brīvajā skaņas laukā tālu no atstarojošo objektu ietekmes skaņa no punktveida avota sfērisku viļņu veidā vienmērīgi izplatās visos virzienos. Turklāt skaņas intensitāte samazinās, pieaugot attālumam no skaņas avota.

Skaņas intensitāte (skaņas jauda uz laukuma vienību) ir vienāda visos virzienos. Riņķa līnijas ir domātas sfēras ar mainīgu rādiusu r . No avota izstarotā skaņas jauda iziet caur

nosacītu nelielo taisnstūrveida laukumu A_1 , kas ir attālumā r . Tāpat jauda turpina kustību caur laukumiem A_2 , A_3 , A_4 , kuri atrodas attiecīgi attālos $2r$, $3r$, $4r$. Pieaugot sfēras rādiusam, pieaug r , pieaug šķērsojamie laukumi, kuros izkliedējas tā pati jauda. Tātad, pieaugot attālumam, intensitāte samazinās. Šis samazinājums ir saistīts ar skaņas enerģijas ģeometrisku izplatīšanos un nav burtiski jāsaprot kā zudumi.

3.3. SKAŅAS INTENSITĀTE BRĪVĀ LAUKĀ

Aplūkojot skaņas diverģenci (sk. 3.1. att.), novērojām, ka no punktveida avota skaņa izplatās sfēriski. Sfēriskās virsmas laukums ir:

$$S = 4\pi r^2. \quad (3.1.)$$

Tātad jebkura maza segmenta laukums uz sfēriskās virsmas mainās proporcionāli rādiusa kvadrātam r^2 .

Tas nozīmē, ka skaņas intensitāte samazinās atkarībā no rādiusa kvadrāta. Tas ir inversais kvadrātiskais likums.

Punktveida skaņas avota skaņas intensitāte brīvā laukā ir apgriezti proporcionāla attāluma (rādiusa) kvadrātam. Citiem vārdiem sakot, intensitāte ir proporcionāla $1/r^2$. Vispārīgā veidā to var pierakstīt šādi:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}, \frac{W}{m^2}, \quad (3.2.)$$

kur: I – intensitāte;

P – avota jauda;

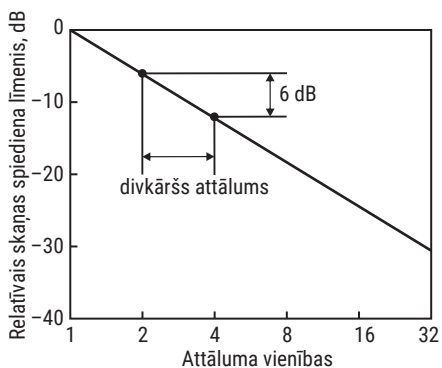
r – attālums (rādiuss) no avota.

Šai vienādojumā, kur P un 4π ir konstanti lielumi, redzam, ka, palielinot attālumu no r līdz $2r$, intensitāte samazinās uz $1/4$, jo attālums ir dubultojies, bet virsma palielinājusies 4 reizes salīdzinājumā ar iepriekšējo. Līdzīgi ir, attālumu trīskāršojot. Intensitātes lielums samazinās uz $1/9$. Ja attālums pieaug 4 reizes, intensitāte samazinās uz $1/16$. Līdzīga sakarība ir arī tad, ja attālums samazinās no $2r$ uz r . Intensitāte pieaug no I uz $4I$.

3.4. SKAŅAS SPIEDIENS BRĪVĀ LAUKĀ

Skaņas intensitāti (jauda uz laukuma vienību) ir grūti izmērīt. Savukārt skaņas spiediena mērījumus var veikt salīdzinoši vienkārši, piemēram, ar parastu mikrofonu. Lietojot skaņas spiediena jēdzienu, brīvā skaņas lauka vienādojums ir jāmodificē. Šajā gadījumā skaņas intensitāte ir proporcionāla skaņas spiediena kvadrātam, un intensitātes inversais kvadrātiskais likums kļūst par spiediena inversā attāluma likumu.

Proti, skaņas spiediens ir apgriezti proporcionāls attālumam r :



3.2. att. Skaņas spiediena līmenis un attālums brīvā laukā.

$$P = \frac{k}{r}, \quad (3.3.)$$

kur: P – skaņas spiediens;

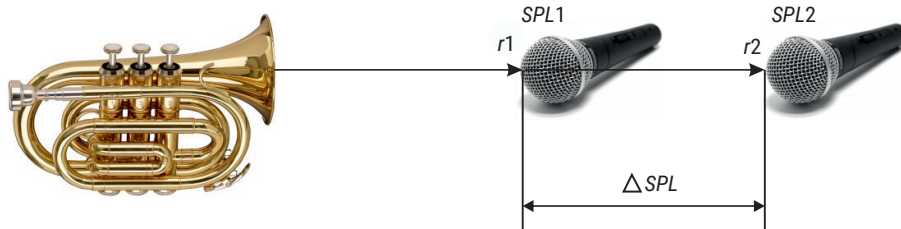
k – konstante;

r – attālums no avota (rādiuss).

Atmetot konstanti, iegūstam:

$$P = \frac{1}{r}. \quad (3.4.)$$

Palielinot attālumu no skaņas avota 2 reizes, skaņas spiediens samazinās uz pusi. Skaņas spiediena līmeņa izmaiņas atkarībā no attāluma grafiski attēlotas 3.2. attēlā.



3.3. att. Skaņas spiediena līmeņa maiņa.

Attēls ilustrē spiediena inversā attāluma likumu, proti, attālumam dubultojoties, skaņas spiediena līmenis samazinās par **6 dB**. Šī sakarība ir piemērojama brīvajam skaņas laukam, bet praksē tā bieži tiek lietota, nosakot skaņas spiediena līmeni.

3.5. BRĪVĀ LAUKA SKAŅAS DIVERĢENCE

Zinot skaņas spiediena līmeni *SPL* (*Sound Pressure Level*) *SPL1* attālumā r_1 , var aprēķināt skaņas spiediena līmeni *SPL2* attālumā r_2 (3.3. att):

$$SPL2 = SPL1 - 20 \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right). \quad (3.5.)$$

Tātad skaņas spiediena līmeņu starpība starp diviem punktiem ir izsakāma kā attālumu r_1 un r_2 attiecība:

$$SPL2 - SPL1 = 20 \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right). \quad (3.6.)$$

Piemēri:

Ja 10 metru attālumā spiediena līmenis ir 80 dB, tad varam to aprēķināt 15 metru attālumā:

$$20 \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right) = 20 \log \left(\frac{10}{15} \right) = -3,5 \text{ dB},$$

tad iegūstam

$$80 - 3,5 = 76,5 \text{ dB SPL}.$$

Līdzīgi var noteikt spiediena līmeni 7 metru attālumā:

$$20 \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right) = 20 \log \left(\frac{10}{7} \right) = +3,1 \text{ dB},$$

tad iegūstam

$$80 + 3,1 = 83,1 \text{ dB SPL}.$$

Šīs sakarības ir patiesas brīvajā skaņas laukā, kur skaņa izplatās (divergē) sfērisku viļņu veidā, taču aptuveni aprēķiniem ir izmantojama arī citos apstākļos.

Piemēram, ja ierakstu studijā mikrofons atrodas **1,6 m** attālumā no dziedātāja un līmeņa indikators **VU** pīķi uzrāda pie **+6 dB**, tad pārvietojot mikrofonu **3,2 m** attālumā, indikatora rādījums samazināsies apmēram par **6 dB**. *Apmēram* tāpēc, ka precīza sakarība ir spēkā tikai brīvā laukā.

Praksē no sienām atstarotā enerģija var izmainīt šo dubultā attāluma sakarību, rezultātā līmeņa izmaiņas var būt atšķirīgas no **6 dB**.

Izprotot šīs attiecības, būs vieglāk apjaust akustisko situāciju reālos apstākļos. Mainot attālumu no **1,6 m** uz **3,2 m** vai no **16 m** uz **32 m**, spiediena

līmenis izmainīsies par to pašu lielumu – **6 dB**. Šo vēlams atcerēties, veicot apskaņošanu āra apstākļos.

Ne vienmēr skaņas avoti ir punktveida. Piemēram, modelējot noslogotu autoceļu, labāk ir pieņemt, ka skaņas avoti ir punktveida un summējoties izvietojas uz līnijas. Tad var pieņemt, ka skaņa izplatās cilindrā ap šo nosacīto līniju. Šajā gadījumā skaņas intensitāte ir apgriezti proporcionāla attālumam no avota. Dubultojojoties attālumam no r uz $2r$, intensitāte samazinās no I uz $I/2$, tas ir, par 3 dB.



ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅAM

1. Kas ir brīvais lauks un ar ko tas raksturojas?
2. Ar ko raksturojas bezatbalss kamera?
3. Kādu skaņas avotu sauc par punktveida?
4. Kāda ir skaņas lauka intensitātes un attāluma matemātiskā sakarība?
5. Kāda ir skaņas spiediena un attāluma brīvā laukā matemātiskā sakarība?
6. Par cik dB mainās skaņas spiediena līmenis, ja attālums izmainās divas reizes?

TELPU AKUSTIKA



04

- 4.1. Skaņas lauki slēgtā telpā
- 4.2. Atstarošanās



Atmiņas un prāta treniņam

Pētīt skaņas izplatību slēgtā telpā nenozīmē pētīt tikai tās virzību, starojot turp un atstarojoties atpakaļ, bet arī veikt mērījumus šādos mainīgos apstākļos. Svarīgi ir arī izpētīt dažādu materiālu ietekmi uz skaņas izplatību. Tikpat svarīgi ir izprast skaņas uzvedību šādā slēgtā telpā saistībā ar klausītāja dzirdes izjūtu kritērijiem.

Skaņas izcelsmes avots var atrasties gan šajā telpā, gan arī tas var būt attālināts un piesaistīts ar mikroфона un atbilstošas aparatūras palīdzību. Akustisko konstrukciju psiholoģiskie kritēriji bieži vien dzimst pētnieku prātos. Mēs apskatīsim fizikālo akustiku. Ir divas galējības, pētot skaņu slēgtā telpā. Taču tās ir viegli analizējamas un izprotamas.

Pirmo galējību raksturo vienkāršas formas nelieli tilpumi. Piemēram, regulāras formas kastes, cilindriskas caurules, sfēriskas konstrukcijas. Šajā gadījumā iekšējo akustisko lauku apraksta un izskaidro ar precīzām matemātiskām izteiksmēm, taču analīze kļūst sarežģītāka, ja tilpuma iekšējās sienas daļēji vai pilnīgi ir pārklātas ar skaņu absorbējošu materiālu.

Otra galējība – ļoti lieli neregulāras formas tilpumi, kuros nav iespējams precīzi aprakstīt skaņas lauku, bet var izveidot statistiski ticamus datus par telpu, balstītos uz aptuveniem nosacījumiem par telpu un tās parametriem.

Te varētu būt analogija ar fiziķi, kurš veic pētījumu par konkrēta cilvēka iespējamo mūža ilgumu, pretstatā tam, lai pētītu un apstrādātu statistikas datus par iedzīvotāju mūža ilgumu.

Statistikas pētījumi tiek veikti ar salīdzinoši vienkāršāku matemātisko formulu palīdzību pretstatā detalizētam konkrētas problēmas pētījumam.

4.1. SKAŅAS LAUKI SLĒGTĀ TELPĀ

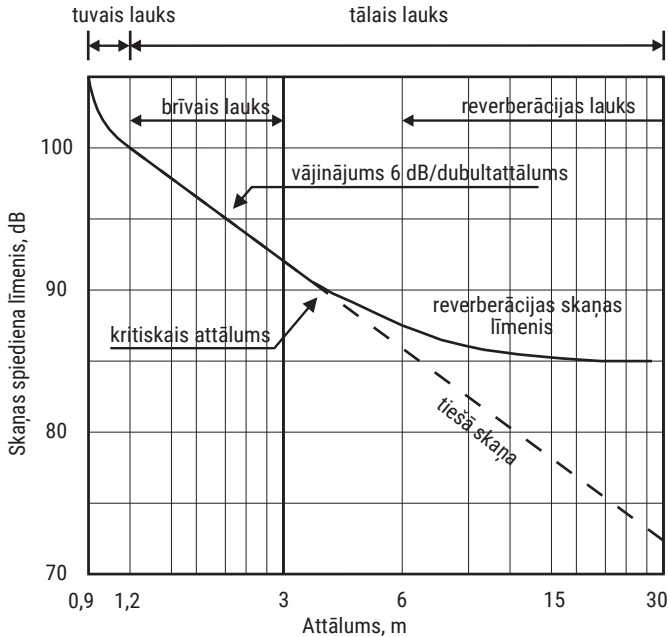
Brīvie lauki eksistē slēgtās telpās, ja tajās nav atbalss. Tomēr lielākajā daļā telpu tiešā skaņa, kombinējoties ar no telpas virsmām atstaroto skaņu, ietekmē sakarību starp skaņas līmeņa samazinājumu un attālumu.

Šajos apstākļos nedarbojas ne inversais kvadrātiskais intensitātes likums, ne inversais spiediena līmeņa distances likums, lai varētu aprakstīt visu skaņas lauku.

Brīvā laukā var aprēķināt skaņas līmeni saistībā ar attālumu. Pretstatā, teicami reverberētā skaņas laukā skaņas līmenis visos skaņas lauka punktus ir identisks. Praktiski visa slēgtā telpa ir aizpildīta ar tiešo un atstaroto skaņu.

Piemēram, pieņemsim, ka noslēgtā telpā ir skaļrunis, kas 1,2 m attālumā spēj radīt 100 dB skaņas spiediena līmeni dB SPL. Aplūkosim 4.1. attēlu.

Skaļrunim ļoti tuvajā apgabalā skaņas lauks ir diezgan mainīgs. Veicot mērījumus ļoti tuvu skaļrunim, to nevar uzskatīt par punktveida skaņas avotu.



4.1. att. Skaņas spiediena līmenis un attālums.

Šo apgabalu sauc par tuvo lauku, un tajā, attālumam dubultojušies, skaņas līmenis samazinās apmēram par 12 dB. Praktiskajos mērījumos šis apgabals tiek izmantots reti. Lauka definīcija ir saistīta ar skaņas avota dimensijām un viļņa garumu (apmēram divi viļņi).

Ja attālināmies no skaļruņa par vairākiem tā gabarītmēriem, nonākam tālajā laukā, kurā var veikt ticamus mērījumus. Tālo lauku veido brīvais lauks, reverberācijas lauks un pārejas apgabals starp šiem laukiem.

Aptuveni brīvā lauka nosacījumi eksistē netālu no skaļruņa, kuru var uzskatīt par punktveida avotu. Šajā nelielajā telpā dominē tiešā skaņa, kas izplatās ar sfēriska viļņa palīdzību, un atstarotās enerģijas līmenis ir gaužam niecīgs, lai to ievērotu. Te darbojas inversais attāluma likums: attālumam dubultojušies, skaņas spiediena līmenis samazinās par 6 dB.

Izplatoties tālāk no skaļruņa, skaņa atstarojas no telpas virsmām un ietekmē kopējo skanējumu. Noteiksim telpā kritisko attālumu punktam, kurā tiešajai skaņai un atstarotajai skaņai ir vienādi līmeņi. Kritiskā distance ir noderīgs lielums, kas aptuveni raksturo akustisko vidi.

Jo tālāk no skaņas avota, jo reverberētās skaņas lauks kļūst ievērojamāks un nemainīgāks. Reverberētās skaņas lauka līmenis ir atkarīgs no telpas absorbcijas spējām. Jo augstāks ir absorbcijas līmenis, jo zemāks ir reverberācijas līmenis. Salīdzinājumam var minēt divas telpas ar atšķirīgiem sienu apdares materiāliem: akmens vates sienas vai pulēta marmora sienas.

4.2. ATSTAROŠANĀS

Iztēlosimies skaņas avotu brīvā laukā, piemēram, pļavā. Skaņa no avota plūst radiāli visos virzienos. Tiešā skaņa no avota plūst jums garām un nekad neatgriežas.

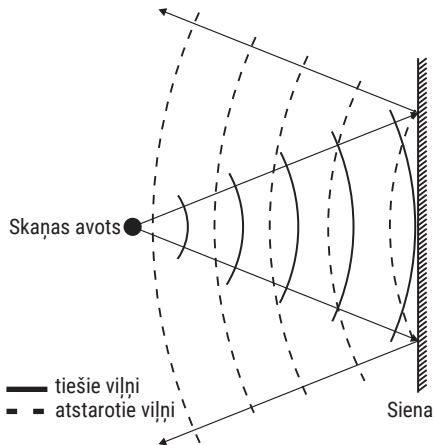
Un tagad iztēlojieties to pašu avotu kādā telpā. Tiešā skaņa plūst jums garām, bet, sasniedzot telpas robežvirsmas, tā atstarojas. Tādējādi tiešā skaņa garām plūst vienreiz, bet atstarotā daudzkārtīgi, līdz tā izsīkst.

Atstarotā skaņa satur būtisku informāciju par telpas izmēriem, formu un robežvirsmu attālumiem. Tā palīdz noteikt telpas akustiskos parametrus. Ne mazāk svarīgi ir arī tas, ka atstarojumi patīkami uzlabo skaņas kvalitāti – klausītāja subjektīvās izjūtas. Taču tepat arī ir jāpiemin, ka atstarojumi spēj arī būtiski sagraut skaņas kvalitāti.

4.2.1. SPOGUĻATSTAROŠANĀS

Atstarošanās no plakanas virsmas mehānisms ir vienkāršs. 4.2. attēlā redzams, kā atstarojas punktveida skaņas avota viļņi no stingras, līdzenas sienas virsmas.

Skaņas viļņi no skaņas avota izplatās līdz sienas virsmai un tad atstarojas atpakaļ avota virzienā. Šāda veida atstarošanos sauc par spoguļatstarošanos un tā notiek tieši tāpat, kā gaismai atstarojoties no spoguļa, kuru apraksta Snela (*Snell*) likums.



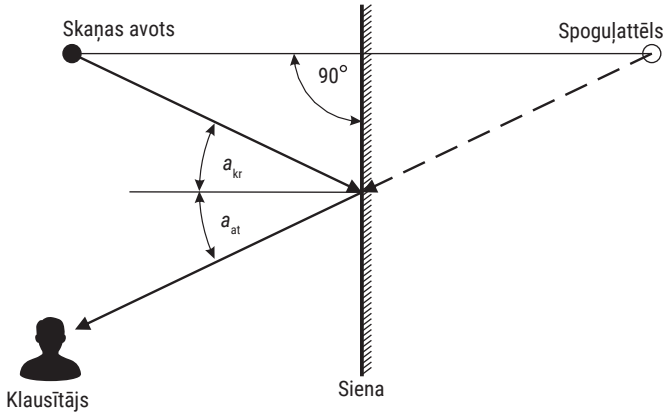
4.2. att. Atstarošanās no plakanas virsmas.

Skaņas atstarošanos apraksta tas pats likums, kas gaismas atstarošanos. Atstarošanās leņķis ir vienāds ar krišanas leņķi (4.3. att.).

Ģeometriski a_{at} ir vienāds ar a_{kr} . Turklāt atstarotās skaņas avots ir iedomāts, tāpat kā spoguļattēls. Virtuālais skaņas avots atrodas aiz atstarojošās virsmas. Spoguļattēla attālums no virsmas ir vienāds ar īstenā skaņas avota attālumu.

Apskatītā spoguļatstarošanās ir vienkāršākais atstarošanās veids.

Ja skaņa atdurās pret vairākām virsmām, tad notiek vairākkārtēja atstarošanās.



4.3. att. Spoguļatstarošanas.

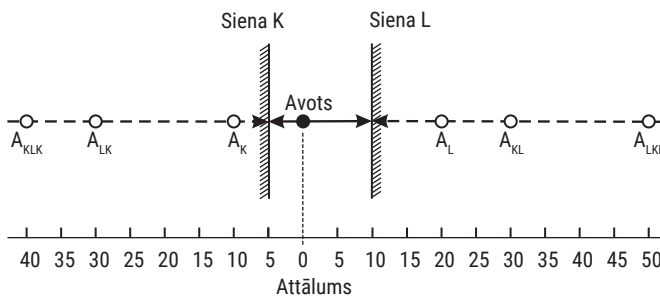
Virtuālajiem spoguļattēliem parādās jauni virtuālie spoguļattēli. Aplūkosim divas paralēlas virsmas K un L (4.4. att.).

Ja skaņas vilnis šķērso sienu K , tad rodas virtuāls skaņas avots AK (pirmās kārtas iedomātais spoguļattēls). Tāds pats virtuāls avots atrodas arī punktā AL . Šo virtuālo avotu skaņas viļņi turpina atstaroties turp-atpakaļ, bet jau šķērsojot abas sienas. Veidojas jauni virtuālie skaņas avoti ALK un AKL un attiecīgi $AKLK$ un $AKLKL$.

Attēlā redzams, ka attālums starp sienām ir 15 vienības. Pirmās kārtas virtuālo avotu AK un AL attālums ir 30 vienības, otrās 60, trešās 90 utt.

Izmantojot šādu modelēšanas paņēmieni, var ignorēt sienas un pieņemt, ka skaņa nāk no daudziem virtuāliem avotiem, kuri ir izvietoti attālināti no patiesā skaņas avota.

Virtuālās skaņas ierašanās aizture ir proporcionāla attālumam no avota. Taisnstūrveida istabā ir sešas virsmas un katrai no tām ir virtuālais skaņas avots, kas sūta atpakaļ skaņas enerģiju uztvērēja virzienā. Veidojas ļoti sarežģīts skaņas lauks.



4.4. att. Atstarošanas no vairākām paralēlām virsmām.

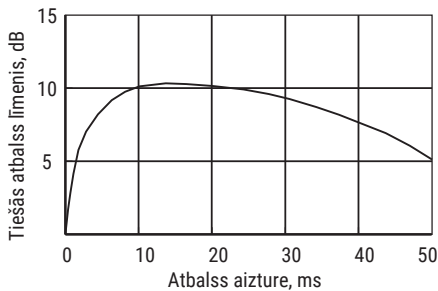
4.2.2. PRIORITĀTES EFEKTS – HĀSA (Hass) EFEKTS

Mūsu dzirde īsā laika intervālā spēj integrēt telpā izkļiedētas skaņas un, ievērojot dažus nosacījumus, uztver tās, kā no viena skaņas avota nākušas. Piemēram, **35 ms** laikā, pēc patiesā skaņas avota signāla uztveršanas, mūsu dzirde un smadzenes spēj apvienot – integrēt – visas atstarotās skaņas un radīt sajūtu, ka visu skaņu avots ir tikai viens, kaut gan esam uztvēruši arī daudzas atstarotās skaņas.

Tas ir psihoakustisks efekts. Pirmā skaņa, kuru uztveram, nostiprina mūsu dzirdes sistēmā skaņas avota atrašanās vietu. Pienākot vēlākām skaņām, tās tiek salīdzinātas ar pirmo. Šo sakarību sauc dažādi: gan par prioritātes efektu, gan par Hāsa efektu, gan par pirmās viļņu frontes efektu. Turklāt šī perioda laikā integrētā skaņas enerģija rada skaļuma pieauguma izjūtu. Tas nav pārsteigums, ka cilvēka dzirde spēj sapludināt – apvienot – dažādas skaņas, ja vien tās ir pienākušas noteiktā laika intervālā.

Tāpat kā kino, ja kadru frekvence ir **16 Hz** (periods 62 ms), tad attēlu uztveram kā plūstošu kustību. Ja laiks ir lielāks par **35 ms**, mēs sākam uztvert izmaiņas. Laika intervālā **50–80 ms** saplūšana pārtrūkst, un pie lielākām aizturēm mēs dzirdam diskretu atbalsi.

Šos rezultātus zinātnieks Hāss ieguva, veicot šādu eksperimentu sēriju. Eksperimenti notika bezatbalss kamerā. Divi skaļruņi tika simetriski novietoti **3 m** attālumā un **45 grādu** leņķī pret klausītāju. Abi skaļruņi atskaņoja vienu un to pašu runu ar vienādu skaļuma līmeni, tikai vienā no skaņas kanāliem bija iespēja ienest aizturi. Pētījums tika veikts, mainot aiztures lielumu, un iegūtie rezultāti sniedza šādu informāciju. Ja aizture ir **5–35 ms** robežās, tad dzirde abus skaņas avotus uztver kā skaņas avotu bez aiztures. Pie tam skaņas kanāla ar



4.5. att. Hāsa efekts.

aizturi skaļuma līmeni var paaugstināt pat par **10 dB**, iekams sāk just kanālu atšķirības (4.5. att). Šo, līdz **35 ms**, zonu sauc par skaņas saplūšanas jeb Hāsa zonu.

Tātad integrētās atstarotās skaņas paaugstina tiešās skaņas skaļuma līmeni un var arī mainīt tembru. Pētījuma autors Hāss esot izteicies: „...*tās ir patikamas skaņas uztveres izmaiņas, palielinot skaņas avota telpiskumu, lai gan atbalss avots netiek uztverts akustiski.*”

4.2.3. VIBRĒJOŠĀ ATBALSS

4.4. attēlā redzamās paralēlās sienas rada problēmas akustikā. Ja attālums starp sienām ir tik liels, ka laiks starp atstarotajām skaņām ir ārpus Hāsa

zonas, parādās vibrējoša atbalss, kuras iemesls ir skaņas lēkājošā atstarošanās no sienām.

Auss ir ļoti jutīga pret šādu ciklisku atstarošanos, tā ir ļoti nevēlama parādība akustikā. Teorētiski telpai, kurai ir ideāli atstarojošas sienas, var būt bezgalīgi liels skaits virtuālo skaņas avotu. To pašu var novērot, ja paralēli vienu otram pretī novieto spoguļus. Praksē tā gluži nav, jo enerģija atstarojoties mazinās, tā tiek absorbēta vai izkliedēta.

Sakarā ar minēto problēmu, ja vien ir iespējams, vēlams izvairīties no paralēlām sienām vai arī tās pārklāt ar absorbējošu vai izkliedējošu materiālu. Izmainot sienu leņķi par **5-10°**, ir iespējams mazināt vibrējošās atbalss efektu. Piemēram, skaņu ierakstu studijas pulsts logs nav novietots vertikāli.

Kad skaņa sasniedz robežvirsmu, daļa enerģijas tiek absorbēta un daļa enerģijas tiek atstarota. Atstarotā enerģija vienmēr ir mazāka par sākotnējo enerģiju. Ja virsma ir veidota vai pārklāta ar smagu materiālu (mērot virsmas vienības masu), tad tā parasti ir vairāk reflektējoša nekā absorbējoša salīdzinājumā ar viegliem materiāliem.

Skaņa var atstaroties daudzkārt un klejot telpā, ar katru atstarošanās reizi samazinoties atstarotā signāla enerģijai. Atstarotais signāls ir atkarīgs no atstarojošā objekta virsmas izmēriem. Vispārīgi var teikt, ka skaņa atstarosies no taisnstūrveida paneļa virsmas, ja tā malu garums būs **5** reizes lielāks, nekā dotās skaņas viļņa garums. Tātad atstarojošie objekti ir frekvenču atkarīgi.

Praktisks piemērs. Ja kvadrāts ir aptuveni ar **A4** lapas (0,297·0,210 m) garākās malas izmēru, tad attiecīgā frekvence būs ap **6 kHz**. Novietojiet šādu reflektoru starp sevi un skaņas avotu un attāliniet un tuviniet to un jūs dzirdēsiet būtiskas izmaiņas augsto frekvenču galā. Tajā pašā laikā pie **20 Hz**, absolūti nekāda efekta, bez akustiskās ēnošanas.

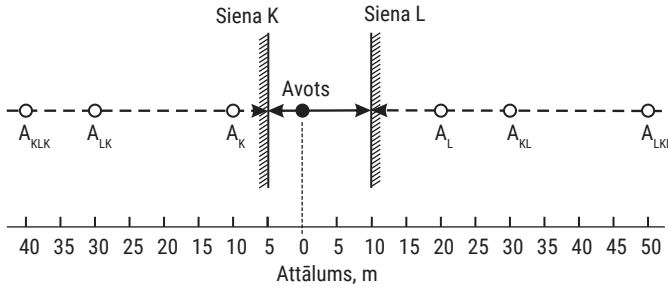
4.2.4. SPIEDIENA DUBULTOŠANĀS, SKAŅAI ATSTAROJOTIES

Ja virsma ir teicams absorbētājs, tad spiediens uz robežvirsmas ir ekvivalents sākotnējā starojuma enerģijas blīvumam. Ja virsma ir teicams atstarotājs, tad spiediens uz robežvirsmas ir ekvivalents sākotnējā un atstarotā signāla enerģijas blīvumam.

Spiediens uz robežvirsmas ideālas atstarošanās gadījumā ir divas reizes lielāks par spiedienu ideālas absorbēšanas gadījumā. Ideālas atstarošanās gadījumā viļņu amplitūdas summējas. Šī sakarība ir ļoti svarīga, aplūkojot stāvviļņus.

4.2.5. STĀVVIĻŅI

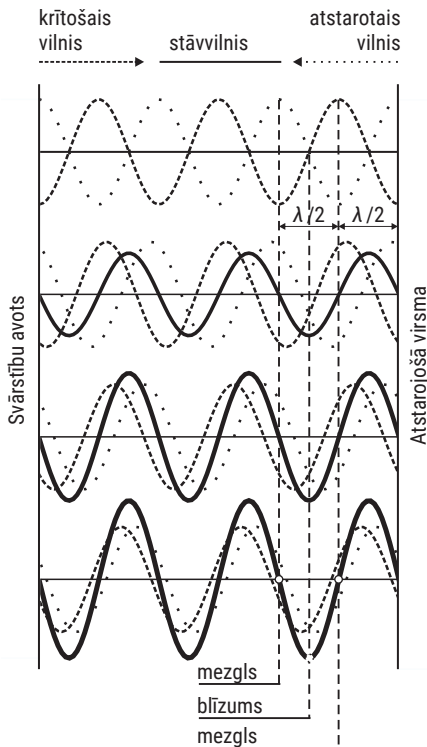
Tātad stāvviļņi vistiešākajā veidā ir saistīti ar skaņas atstarošanos. Pieņemsim, ka ir divas, paralēlas, cietas virsmas, attālināti novietotas viena no otras (4.6. att.). Skaņas avots, kas atrodas starp tām, izstaro skaņu ar kādu



4.6. att. Atstarošanās starp paralēlām virsmām.

noteiktu frekvenci. Attēlā redzams, ka skaņas viļņi sasniedz pa labi novietoto virsmu un atstarojas skaņas avota virzienā. Tad sasniedz pa kreisi novietoto virsmu un atkal atstarojas, un tā šis process turpinās. Viens vilnis pārvietojas pa labi, bet otrs pa kreisi. Šie divi kustīgie viļņi, savstarpēji mijiedarbojoties, veido stāvvilņus (4.7. att).

Stāvvilnis ir nekustīgs, kaut gan to veido divi kustīgi viļņi. Izstarotās skaņas frekvence veido rezonanses nosacījumus, kas ir atkarīgi no viļņa garuma un attāluma starp virsmām. Šī parādība ir saistīta ar skaņas atstarošanu no divām savstarpēji paralēli novietotām virsmām.



4.7. att. Stāvvilņu veidošanās.

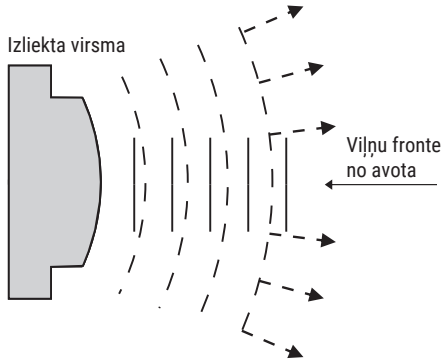
4.2.6. ATSTAROŠANĀS NO IZLIEKTĀM VIRSMĀM

Pieņemot, ka skaņa ir stari, to ir vienkāršāk pētīt. Savukārt katru staru var uzskatīt par staru kūli ar atšķirīgu skaņu un sfērisku viļņu fronti un uz šo staru kūli var attiecināt inverso kvadrātisko likumu:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}. \tag{4.1}$$

Punktveida skaņas avota izstarotos sfēriskos viļņus, tiem būtiski attālinoties no skaņas avota, var uzskatīt par plakaniem viļņiem.

Plakanam vilnim atstarojoties no cietas, izliektas virsmas, skaņas enerģija tiek izkaisīta daudzās virzienos (4.8. att.).



4.8. att. Atstarošanās no izliektas, cietas virsmas.

Atstarošanās neregularitāte ir saistīta ar skaņas viļņu amplitūdas mainīgo fāzi. Atstarotā skaņa nonāk atpakaļ telpā un mijiedarbojas ar tiešo skaņu, veidojot sarežģītas amplitūdu fāzu kombinācijas, veidojas interferences lauks un tā rezultātā sākotnējā skaņa tiek izkliedēta.

Skaņu absorbējošie moduļi ar sarežģītu virsmas konfigurāciju veic dubultu funkciju. Tie skaņu telpā gan absorbē, gan izkliedē.

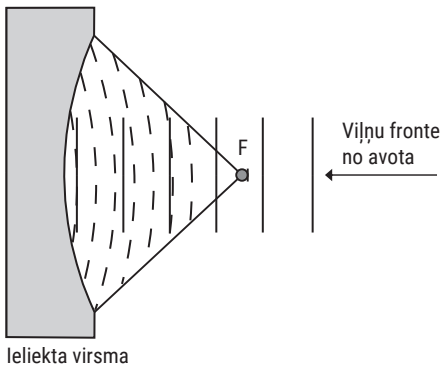
4.2.7. ATSTAROŠANĀS NO IELIEKTĀM VIRSMĀM

Plakani viļņi, sasniedzot ieliektu virsmu, atstarojas un fokusējas vienā punktā (4.9. att.).

Skaņas fokusa punktu noteic virsmas forma un tās relatīvie izmēri. Sfēriskas ieliektas virsmas audiotehnikā tiek plaši izmantotas.

Piemēram, šādu atstarojošu virsmu izmanto, lai izveidotu izteiktas virziendarbības mikrofonu. Šajā konstrukcijā mikrofons tiek novietots fokusā F. Šādas konstrukcijas mikrofons dod teicamus rezultātus, ierakstot skaņas sporta pasākumos atklātā telpā, ierakstot putnu un dzīvnieku balsis brīvā dabā.

Šāda ieliekta atstarotāja efektivitāte ir atkarīga no tā izmēriem un no skaņas viļņa garuma. Piemēram, ja sfēriska reflektora diametrs ir **1 m**, tad tas dod būtisku **SPL** pacēlumu virs **1 kHz**, bet pie **200 Hz** virziendarbības efekts nav jūtams.

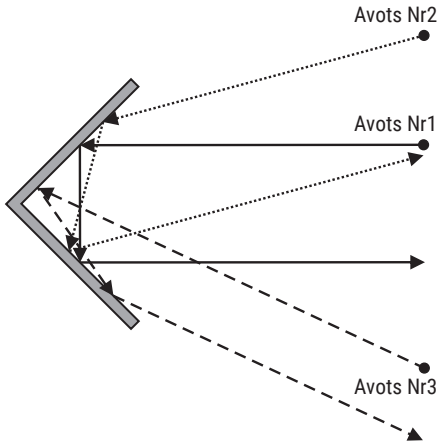


4.9. att. Atstarošanās no ieliektas, cietas virsmas.

Ieliektas virsmas telpu arhitektūrā var radīt skaņas uztveres problēmas, jo tās koncentrē skaņas enerģiju pretējā virzienā attiecībā pret skaņas izcelsmes avotu.

4.2.8. STŪRA ATSTAROŠANĀS

Ikdienā, runājot par atstarošanu, mēs lielākoties domājam par skaņas perpendikulāru atstarošanu no apkārtējām sienām, taču tās nav



4.10. att. Atstarošanās no telpas stūra.

vienīgās vietas. Skaņas atstarošanās notiek arī no telpu stūriem (4.10. att.).

Pie tam atstarošanās seko skaņas avotam pa visu telpu. Stūra atstarotājs saņem skaņu no avota **Nr. 1**, atstaro to divas reizes un sūta atpakaļ skaņa avota virzienā. Tas pats notiek, pārvietojot skaņas avotu uz pozīciju Nr. 2 vai Nr. 3.

Tātad stūra atstarošanās pamatīpašība ir sūtīt atstaroto skaņu skaņas avota virzienā, un enerģijas zudumi veidojas, saskaroties ar divām virsmām. Līdz ar to atstarotā signāla intensitāte ir zemāka nekā gadījumā, kad tas atstarojas no vienas virsmas

un veic to pašu distanci.

Apskatītajā piemērā ir tikai divas virsmas, bet princips *seko skaņas avotam* saglabājas arī tad, ja stūri veido trīs virsmas: griesti-sienas, grīda-sienas.

2017. gadā Vācijas pilsētā Hamburgā tika atklāta Elbas filharmonijas koncertzāle. Profesionāļi un klausītāji tās akustiku vērtē kā izcilu. Aplūkojot zāles virsmu pārklājumus tuvplānā, ir redzami visi iepriekšminētās atstarošanās elementi.

4.2.9. ATSTAROTĀS SKAŅAS UZTVERE

Gan klausoties mūzikas ierakstus, gan klātesot koncertzālē, gan vienkārši uzturoties akustiskā laukā telpā, tiešā skaņa no avota, kura sasniedz mūsu dzirdi, ļoti ietekmējas no atstarotajām skaņām.

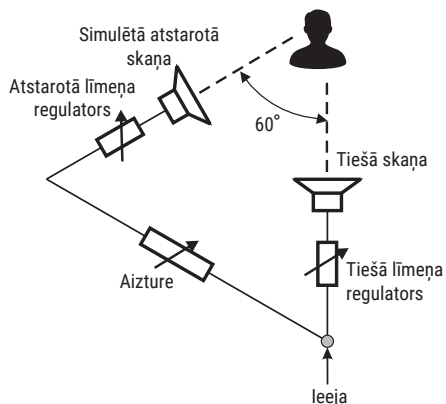
Šīs atstarotās skaņas ir ļoti būtiskas, veidojot mūsu dzirdes izjūtas.

4.2.10. VIENREIZĒJAS ATSTAROŠANĀS EFEKTS

Audio pētniecībā, modelējot skaņas atstarošanas, bieži izmanto šādu skaļruņu slēguma shēmu (4.11. att.).

Šis slēgums ir līdzīgs stereofoniskās apskaņošanas slēgumam. Klausītājs atrodas nosacītā virsotnē, ko veido divi skaļruņi, kuru starojuma asis veido apmēram 60° leņķi (leņķis var būt izvēlēts arī cits). Abiem skaļruņiem tiek pievadīts viens un tas pats monofonisks signāls. Viens no skaļruņiem simulē tiešo signālu, savukārt otrs skaļrunis simulē atstaroto signālu un šim skaļrunim pievadīto signālu var aizturēt plašā laika diapazonā.

Šajā pētījumā ir divi mainīgie lielumi: tiešā un atstarotā signāla līmeņi un tiešā un atstarotā signāla laika nobīde.



4.11. att. Atstarotās skaņas simulācijas shēma.

Pētnieki Olive (*Olive*) un Tūle (*Toole*) veica eksperimentus nelielās telpās: ierakstu studijas telpā un mājas apstākļos. Vienā no eksperimentiem tika pētīts simulētās atstarošanās efekts bezatbalss kamerā, atskaņojot runu.

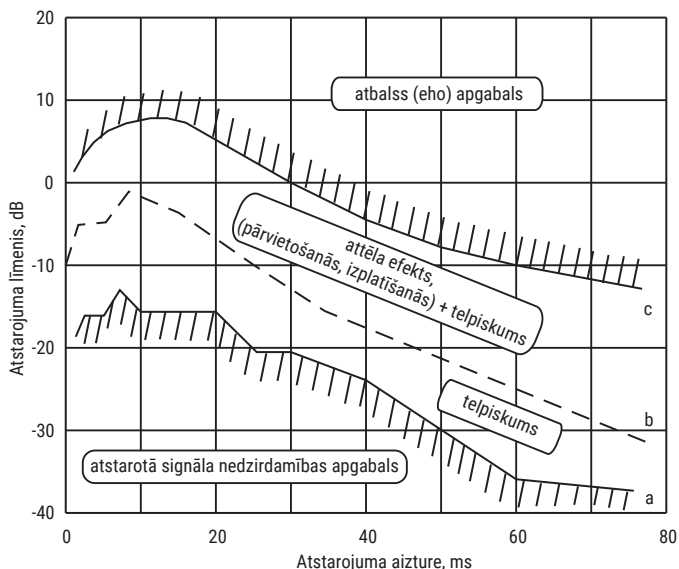
Rezultātu apkopojums ir attēlots 4.12. att., kur redzamas sakarības starp atstarotā signāla līmeni un tā aizturi.

Atstarotais **0 dB** līmenis nozīmē, ka tas ir vienāds ar tiešā signāla līmeni. Savukārt **-10 dB** nozīmē, ka atstarotais signāls ir par **10 dB** vājāks salīdzinājumā ar tiešo signālu. Visos gadījumos atstarotais signāls

pienāk ar **ms** aizturi.

Līkne a ir atbalss dzirdamības sliekšnis. Tas nozīmē, ka nav dzirdama neviena atbalss, kura ir zem šīs līknes, neatkarīgi no aiztures laika. Jāpiezīmē, ka **20 ms** diapazonā šī līkne būtībā ir horizontāla.

Palielinoties aizturai, atstarotā signāla līmeni var būtiski samazināt, lai būtu uz dzirdes robežas. Nelielām telpām **0-20 ms** aizture ir pilnīgi pietiekama.



4.12. att. Atbalss līmenis un aiztures laiks.

Šajā diapazonā atstarotā signāla dzirdamības sliekšnis maz mainās, mainoties aiztures lielumam. Līkne b ir attēla nobīdes sliekšnis.

Līkne c ir robežšķirtne, aiz kuras atstarojums tiek uztverts kā diskrēta atbalss.

4.2.11. TELPISKUMS, ATTĒLA UN ATBALSS UZTVERE

Pieņemsim, ka ir atstarotais signāls ar **10 ms** aizturi. Ja atstarotā signāla līmenis ir ļoti zems, tad atstarotais signāls vispār netiek uztverts. Pieaugot atstarotā signāla līmenim un sasniedzot apmēram **15 dB** līmeni zem tiešā signāla, tas kļūst dzirdams. Pieaugot atstarotā signāla līmenim virs šī punkta, telpai parādās telpiskums, un bezatbalss kamera sāk skanēt kā normāla telpa. Klausītājs netver atstarojumus kā diskrētus notikumus ar izteiktu virziendarbību, bet jūt skanējuma plašumu.

Atstarotās skaņas līmenim turpinot pieaugt, kļūst dzirdams nākamais efekts. Apmēram pie **10 dB** atstarotā signāla robežās sāk iezīmēties šķietamā attēla izmēri un atrašanās vieta. Pie lielākām aizturēm attēls kļūst izplūdis atstarošanās virzienā.

Ja atstarotā signāla līmenis **10–20 ms** aiztures diapazonā sāk palielināties virs dzirdamības sliekšņa **a**, dominēt sāk telpiskuma efekti.

Ja atstarotā signāla līmenis sasniedz **10 dB** virs dzirdamības sliekšņa, sāk parādīties attēla efekts ar tam piemītošiem izmēriem un attēla pārvietošanos.

Atstarotā signāla līmenim pieaugot vēl par **10 dB** virs attēla pārvietošanās sliekšņa, parādās jauns uztveres sliekšnis. Atstarojumi tagad ir diskrēti atbalss signāli, kuri uzklājas centrālajam attēlam. Šādas diskrētas atbalssis bojā skaņas kvalitāti.

Tālāk praktiskajā audiotehnikā ir jākombinē atstarotā signāla līmeņa un aiztures attiecības, lai minimizētu nevēlamo atbalss.

Atstarotā signāla aizture nodrošina uztveres nianšu skaņu laukā. Atstarotā signāla aizture var ietekmēt skaņas telpiskumu, attēla izmērus un atrašanās vietu telpā.

Olive un Tūle izpētīja divu skaļruņu slēguma shēmu (5k. 4.11. att.) un secināja, ka no viena skaļruņa iegūtais efekts korelē ar stereo slēgumu. Tas ļāva spriest, ka viena skaļruņa slēgums ir izmantojams stereo atskaņošanai.

Tie, kuri interesējas par *hi-fi* audiotehniku, šajos atstarojuma pētījumos saskata praktisku ieguvumu. Telpai var piešķirt plašumu, stereo skaņai attēlu, ja vien zinoši un rūpīgi manipulē ar atbalss līmeni un aizturi.

Lai veiksmīgi strādātu ar aizturēto signālu, telpā ir jāminimizē sākotnējie tiešie atstarojumi.



ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅĀM

1. Kāds ir skaņas lauka līmenis visos punktos teicami reverberētā laukā?
2. Ar ko raksturojas tuvais akustiskais lauks?
3. Kāda ir sakarība starp absorbciju un reverberāciju?
4. Kas kopējs gaismai un skaņai?
5. Kas ir spoguļatstarošanās un kā tā strādā?
6. Kas ir Hāsa efekts un ko tas raksturo?
7. Kas ir vibrējoša atbalss?
8. Vai tas ir labi, ja skaņu studijai nav regulāra forma?
9. Kas ir stāvviļņi un kādas ir ar tiem saistītās parādības?
10. Kā grafiski izskatās atstarošanās no ieliektām un izliektām virsmām?
11. Ar ko ir īpatna stūra atstarošanās?
12. Kā savstarpēji saistās atstarotā signāla līmenis un atstarojuma aizture?

DIFRAKCIJA



05

- 5.1. Difrakcija un viļņa frontes izplatība
- 5.2. Difrakcija un viļņa garums
- 5.3. Difrakcija ap šķēršļiem



Atmiņas un prāta treniņam

No fizikas kursa zināms, ka difrakcija ir viļņu apliekšanās ap šķēršļiem. Mēs esam novērojuši, ka skaņa izplatās ap šķēršļiem un ap stūriem.

Piemēram, mājas otrajā stāvā atskaņotā mūzika ir dzirdama gan pirmā stāva zālē, gan citās istabās. Tas notiek, pateicoties atstarojumiem no sienām un citiem šķēršļiem, un ir saistīts arī ar difrakciju. Difrakcija skaņai, kas normāli izplatās taisnvirzienā, liek locīties un turpināt izplatīties citā virzienā.

Difrakcija ir novērojama arī brīvā laukā, ja tur ir sastopami ar viļņa garumu samērojami šķēršļi.

Dzirdamās mūzikas raksturs atšķiras, ja to klausās no attāluma vai tuvu pie skaņas avota. It īpaši izceļas zemie toņi salīdzinājumā ar augstajiem. Tas daļēji skaidrojams ar to, ka zemajiem toņiem ir lielāks viļņa garums, un tie ir spējīgāki aplocīties ap stūriem, apiet šķēršļus un iziet caur atvērumiem.

Pretēji ir ar augstajiem toņiem, kuru viļņu garums ir mazāks. Tie mazāk pakļaujas difrakcijas iedarbībai. Difrakcija mainās atkarībā no skaņas frekvences un tās izplatības ceļā sastapto šķēršļu izmēriem.

Tātad, ja vēlaties kvalitatīvi klausīties mūziku, vidējo un augsto toņu skaļruņiem ir jābūt vērstiem pret klausītāju. Zemo toņu skaļruņiem šī prasība nav tik strikta. Zemie toņi paši atradīs ceļu uz klausītāju.

5.1. DIFRAKCIJA UN VIĻŅA FRONTES IZPLATĪBA

Normālos apstākļos skaņas viļņa fronte izplatās taisnvirzienā, tas ir, pa taisnu līniju. Var pieņemt, ka skaņas stari, kuri konceptuāli apvieno dzirdamās vidējās un augstās frekvences, kā staru kūlis izplatās taisnvirzienā, perpendikulāri viļņa fronteī.

Taisnvirziena kustība tiek saglabāta tik ilgi, kamēr tās ceļā neparādās kāds šķērslis. Šis šķērslis ir spējīgs izmainīt taisnvirziena kustību. Mehānismu, kas spēj mainīt kustības virzienu, sauc par difrakciju. Tas ir latīņu cilmes vārds *diffringere* un nozīmē sadalīt daļās.

Šā mehānisma izpētē liels pienesums ir Īzakam Ņūtonam (*Isaac Newton*) un Kristiānam Heigensam (*Christiaan Huygens*).

Zināmo Heigensa principu var pārfrazēt attiecībā uz skaņu: *Katrs skaņas viļņa frontes punkts, kas ir izgājis caur apertūru vai pagājis garām difrakcijas stūrim, tiek uzskatīts par jaunu punktveida skaņas avotu, kurš izstaro enerģiju ēnas zonā.*

Skaņas enerģiju jebkurā ēnas zonas punktā var noteikt, matemātiski summējot visu šādu uz viļņa frontes esošo avotu enerģiju.

5.2. DIFRAKCIJA UN VIĻŅA GARUMS

Konkrēta izmēra šķēršļa gadījumā zemas frekvences skaņa ar lielu viļņa garumu ir spējīgāka difraktēt, nekā augstas frekvences skaņa ar mazu viļņa garumu un otrādi. Gaismai difrakcija ir mazāk novērojama salīdzinājumā ar skaņu, jo tās viļņa garumi ir būtiski mazāki.

Līdz ar to gaismas ēna ir krietni atšķirīga no akustiskās ēnas. Pirmā stāva zālē jūs varat dzirdēt no otrā stāva difraktēto mūziku, bet gaismu diemžēl neieraudzīsiet.

Šķēršļa efektivitāti skaņas difrakcijai nosaka tā akustiskās dimensijas. Šīs dimensijas nosaka, salīdzinot ar viļņa garumu. Šķērslis ir akustiski mazs, ja vilnis ir garš, un šķērslis ir liels, ja vilnis ir īss.

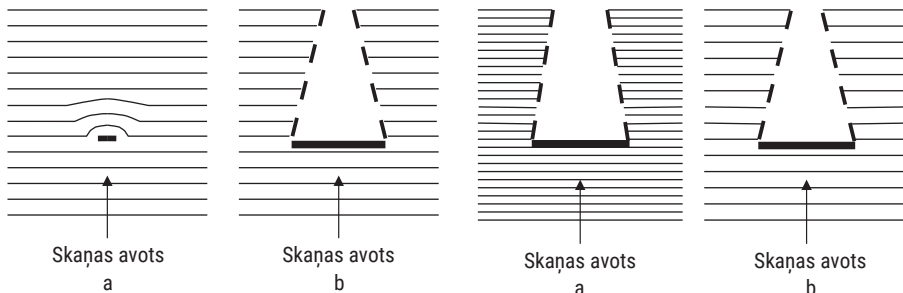
5.3. DIFRAKCIJA AP ŠĶĒRŠLIEM

Ja šķērslis ir akustiski relatīvi mazs attiecībā pret viļņa garumu, tad skaņa viegli difraktēs ap to. Skaņa aplocīsies ap šo nelielo šķērslī, izraisot tikai nelielu traucējumu un radot nelielu akustisko ēnu vai pat to neradot.

Ja šķēršļa dimensijas ir mazākas par viļņa garumu vai tam ekvivalentas, praktiski visas skaņas tiks difraktētas. Katra fronte, kura paiet garām šķērslim, kļūst par jaunu punktveida avotu līniju, kas izstaro enerģiju ēnas zonā.

Turpretī, ja šķērslis ir akustiski relatīvi lielāks par viļņa garumu, difrakcija ir mazāk izteikta, un akustiskā ēna ir lielāka. Šajā gadījumā liela izmēra šķēršļi atstaro skaņu, un var teikt, ka šķērslis ir frekvenču atkarīgs reflektors.

Kā jau tika aprakstīts, tad šķēršļa difrakcijas efektivitāte ir atkarīga no tā akustiskajiem izmēriem. Aplūkosim divus objektus un to uzvedību, ja uz tiem ir virzīti vienāda garuma skaņas viļņi (5.1. att.). Attālums starp līnijām ir dotā viļņa garums. Šinī un turpmākajos zīmējumos ēnas veidošanās robeža ir attēlota nosacīti.



5.1. att. Difrakcija ap dažāda izmēra šķēršļiem ar vienāda garuma viļņiem.

5.2. att. Difrakcija ap viena izmēra šķēršļiem ar dažāda garuma viļņiem.

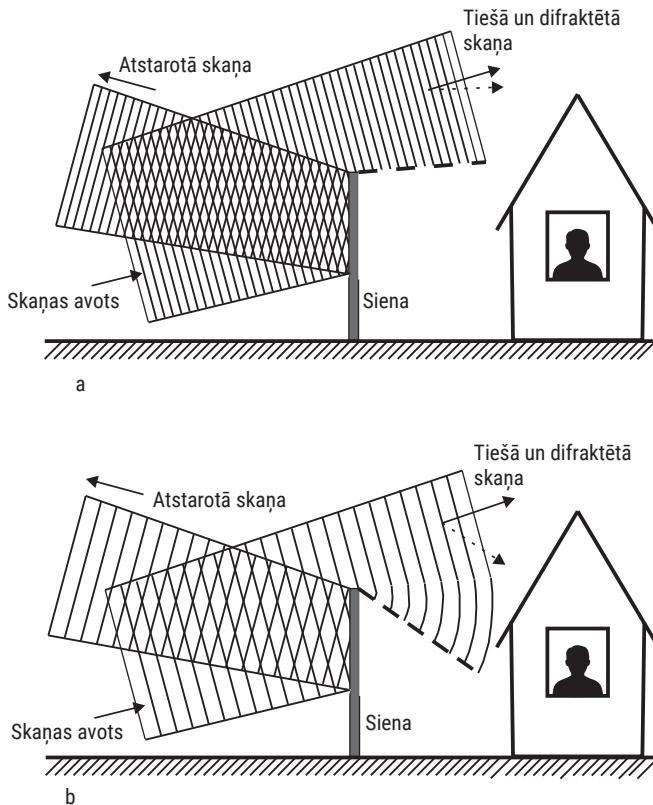
Abos zīmējumos ir vienāda garuma vilnis. Zīmējumā a šķēršļa izmērs ir mazāks par viļņa garumu un skaņa brīvi difraktē ap šķēršli un tam nav būtiskas ietekmes uz skaņas izplatību. Savukārt zīmējumā b šķēršļa izmēri daudzkārt pārsniedz viļņa garumu, difrakcija ir mazāk jūtama, un veidojas akustiskā ēna.

Difrakcijas un viļņa garuma attiecības var aplūkot arī no citām pozīcijām. Proti, ja izmaina salīdzināšanas bāzi, pie tam atceroties, ka akustiskās dimensijas ir saistītas ar skaņas viļņa garumu (5.2. att.).

Attēlā redzami šķēršļi ir vienāda izmēra, bet atšķiras skaņas viļņu garums. 5.2. att. a skaņas frekvence ir augstāka, bet attēlā b skaņas frekvence ir zemāka.

Ir redzams, ka vienāda izmēra šķēršļiem pie augstākas frekvences ēna ir ievērojama (šķērslis ir relatīvi lielāks), bet zemākas frekvences ēna ir mazāka (šķērslis ir relatīvi mazāks).

Praktisks piemērs. Pieņemsim, ka pirmais šķērslis ir ar dimensiju **0,034 m** un otrais šķērslis ar dimensiju **0,34 m**. Uz pirmo šķēršli vērš **1000 Hz** skaņu ar viļņa garumu **0,343 m**, bet uz otro **100 Hz** ar viļņa garumu **3,4 m**. Abi objekti ierosinās vienādu difrakciju.



5.3. att. Akustiskā siena.

Cits praktisks piemērs. Apdzīvotās vietās gar ātrgaitas šosejām ar augstu satiksmes intensitāti tiek uzstādītas akustiskās sienas, lai pasargātu cilvēkus no trokšņa (5.3. att.).

No šosejas nāk relatīvi augstas un zemas frekvences skaņa. 5.3. att. redzams, ka augstajām frekvencēm siena ir relatīvi liela un tā veiksmīgi ekranē skaņu. Pilnīgas skaņas izolācijas nav, bet augstās skaņas vājina vērā ņemami.

Savukārt zemajām skaņām šī siena kļūst akustiski maza, attēls b, un zemās skaņas difraktē un kļūst sadzirdamas. Reālajā situācijā aiz šīs sienas izmainās šosejas trokšņu raksturlīkne, un dzirdami ir tikai zemās frekvences trokšņi.



ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅĀM

1. Kas ir skaņas viļņu difrakcija?
2. Kādi ir Jūsu ieteikumi audiofiliem attiecībā uz skandu un skaļruņu novietojumu?
3. Kā saistās difrakcija, viļņa garums un šķēršļa izmēri?
4. Kādu efektu dod akustiskā siena pie autostrādes?

REVERBERĀCIJA



06

- 6.1. Skaņas spiediena līmeņa pieaugums telpā
- 6.2. Difūzais akustiskais lauks
- 6.3. Sabines formula
- 6.4. Absorbcija gaisā



Atmiņas un prāta treniņam

Ja jūs nospiežat akseļatorā (gāzes) pedāli, automobilis paātrinās līdz noteiktam ātrumam. Ja ceļš ir gluds un horizontāls, tad ātrums saglabājas nemainīgs. Ar noteiktu spēku spiežot uz pedāli, dzinējs attīsta jaudu, kas ir pietiekama, lai pārvarētu berzes spēkus un aerodinamiskos zudumus un noturētu sistēmu līdzsvarā (auto kustās vienmērīgi ar nemainīgu ātrumu).

Ja jūs noņemat kāju no akseļatorā pedāļa, automobilis pakāpeniski palēnināsies un visbeidzot apstāsies.

Skaņa telpā uzvedas līdzīgi. Ja telpā ieslēdz skaņas avotu, tad drīz vien tiek sasniegts līdzsvara stāvoklis, kad avota izstarotā enerģija kompensējas ar zudumiem gaisā un atstarojumiem no telpu norobežojošām virsmām.

Daļa enerģijas absorbējas virsmās. Jo avota izstarotā enerģija ir lielāka, jo augstāks ir līdzsvara punkts un otrādi.

Ja skaņas avotu izslēdz, tad pēc kāda laika skaņa nav dzirdama, tā ir zem dzirdamības sliekšņa. Tātad telpai piemīt īpašība kādu laiku saglabāt skaņas enerģiju. Šo procesu sauc par reverberāciju, bet telpā klejojošo skaņu par reverberējošo skaņu jeb pēcskaņu, kas veido reverberējošo akustisko lauku.

Ja skaņas avota izstarotā skaņa nav stacionāra, bet ir laikā mainīga funkcija $\varphi(t)$, tad pēcskaņu dod katrs tās elements. Skaņu uztverot ar mikrofonu vai ausi, vispirms nonāk skaņas elementa tiešais vilnis un pēc tam dažādi atstarotie viļņi; vienkārtējie, divkārtējie un daudzkārtējie ar arvien lielāku aizkavējumu T un vājinājumu β (6.1. att.).

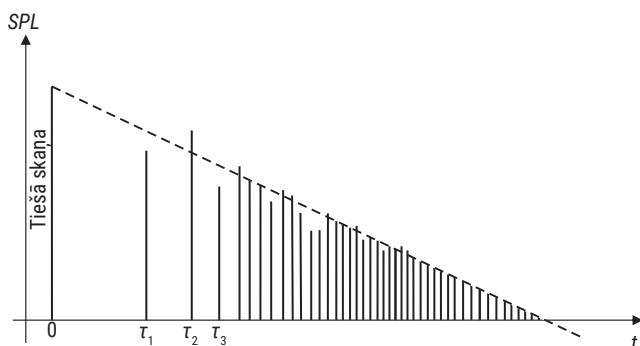
No jebkura skaņas elementa pienākošo akustisko signālu var izteikt ar izteiksmi:

$$f(t) = \varphi(t) + \beta_1\varphi(t-T_1) + \beta_2\varphi(t-T_2) + \dots, \quad (6.1.)$$

kur: $\varphi(t)$ – avota izstarotais skaņas elements;

T_n – atstaroto signālu kavējumi;

B_n – vājinājuma koeficients.



SPL – signāla līmenis log mērogā
 τ_n – atsevišķo atstarojumu kavējumi

6.1. att. Skaņas elementu atstarojumi.

Akustiskā enerģija telpā uzkrājas tik ilgi, kamēr iestājas stacionārs līdzsvars – izstarotā, enerģija kļūs vienāda ar slāpēto. Reverberācijas parametri raksturo telpas akustisko kvalitāti, un tie ir svarīgi klausītājam.

Piemēram, ja simfoniskā orķestra koncertierakstu veiktu bezatbalss kamerā, tad iegūtais ieraksts būtu absolūti nebaudāms klausītājam. Gan simfoniskajai, gan jebkurai citai mūzikai ir nepieciešama reverberācija, lai sasniegtu teicamu skanējuma kvalitāti. Bieži vien gan mūzikai, gan runai, to pārraidot, ir nepieciešama telpas reverberācijas klātesamība, lai skanētu dabiski, jo esam pieraduši šīs skaņas dzirdēt reverberācijas apstākļos. To noteic atskaņotās mūzikas žanrs, kategorija un stils. Reverberācija skaņai piedod telpiskumu un dabīgumu.

Reverberācija ir svarīgs un mērāms parametrs no parametru kopuma, kuri raksturo un nosaka skaņas kvalitāti akustiskajā telpā.

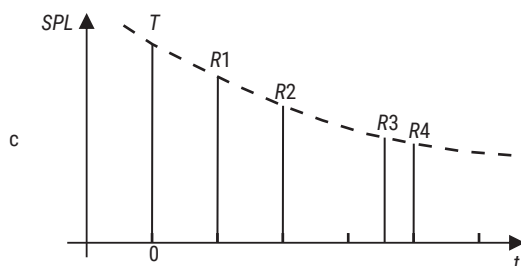
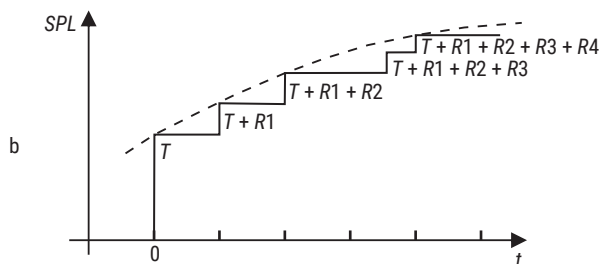
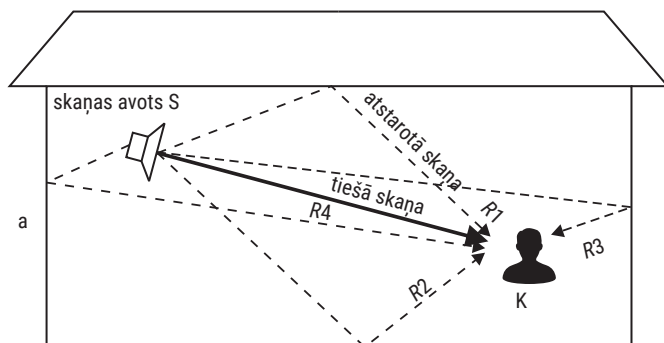
6.1. SKAŅAS SPIEDIENA LĪMEŅA PIEAUGUMS TELPĀ

Ierosinot skaņu telpā, ir jāņem vērā šīs telpas akustiskā enerģija, jo tai piemīt akustiskais līdzsvars. Laiku, kurā tiek sasniegts līdzsvara stāvoklis, nosaka skaņas pieauguma temps telpā. Proti, pieauguma tempu noteic skaņas avota enerģija un telpas akustiskie parametri.

Aplūkosim situāciju telpā, kurā ir skaņas avots un klausītājs (6.2. att.).

Ja skaņas avots nepārtraukti izstaro skaņu, skaņas viļņi izplatās visos virzienos. Skaņas viļņi izplatās klausītāja K virzienā un par nulles laiku jeb atskaites laiku pieņemam momentu, kad tie sasniedz klausītāja ausis, attēls a. Šajā mirklī SPL ar lēcieni sasniedz vērtību T , kas ir mazāka par līmeni pie skaņas avota, jo ir sfēriskā viļņa diverģence un arī nelieli zudumi gaisā. Skaņas līmenis pie klausītāja ir nemainīgs ar vērtību T līdz tam mirklim, kad pienāk atstarotais vilnis $R1$. Spiediena lielums tagad ir $T + R1$. Drīz vien pienāk atstarotais vilnis $R2$, un notiek spiediena pieaugums $T + R1 + R2$. Nonākot līdz klausītājam katrai atstarotajai komponentei, spiediena līmenis pieaug lēcienveidā. Praksē enerģijas pieaugums ir plūdenāks, jo ir ļoti liels skaits atstaroto komponentu. Turklāt šajā vektorālajā summēšanā piedalās divu signālu frekvenču-fāžu raksturlielnes. Klausītājam ir dzirdams SPL pieaugums, jo atstarotās komponentes cita pēc citas summējas ar tiešo signālu un iepriekšējām komponentēm. SPL pie klausītāja nesasniedz galīgo vērtību, jo skaņas viļņi izplatās pa dažāda garuma ceļiem.

Atstarotās komponentes tiek aizturētas par laiku, kas ir proporcionāls tiešo un atstaroto signālu veikto ceļu starpībai. Tādējādi skaņas pieaugums telpā ir relatīvi lēns, bet praksē skaņas līmenis pieaug tik ātri, cik izmaiņas spēj uztvert klausītājs.



6.2. att. Skaņas līmeņa un aiztures eksponenciālās izmaiņas.

Galīgo skaņas līmeni telpā noteic no avota S izstarotā enerģija. Avota izstarotā enerģija tiek izkliedēta kā siltums sienu atstarojumos un absorbcijā, tai skaitā nelielos zudumos gaisā. Ja avots T izstaro konstantu jaudu, tad SPL pieaug (6.2. att. b) un tiecas uz līdzsvara stāvokli starp izstaroto un atstaroto enerģiju.

Palielinot izstaroto jaudu T , līdzsvara stāvoklim būs cita vērtība.

6.2. DIFŪZAIS AKUSTISKAIS LAUKS

Ja telpa ir liela ar neregulāru formu un atstarojumu skaits ir vērā ņemams, reverberējošā skaņa ar noteiktu varbūtību uztvērējam (mikrofonam vai ausij) var pienākt no jebkura virziena, no jebkura leņķa. Ja skaņas pienākšanas varbūtība visiem virzieniem ir vienāda, akustisko lauku sauc par difūzu.

Difūzajā laukā nav izteikta skaņas izplatīšanās virziena, tāpēc, aprēķinot skaņas intensitāti difūzā laukā, nevar izmantot izteiksmes, kuras tika lietotas aprēķinos skrejvilnim virzītā akustiskā laukā.

Difūza lauka gadījumā skaņas intensitāte ir nosakāma pēc šādas izteiksmes:

$$I_d = \frac{I}{4}. \quad (6.2.)$$

Difūzā lauka intensitāte ir četras reizes mazāka par intensitāti virzītā laukā. Ja difūzā laukā veic SPL mērījumu, tad, pārvietojot mikrofonu, ir redzams, ka maksimumi un minimumi ir ļoti cieši viens pie otra salīdzinājumā ar regulāras formas vai mazu izmēru telpu.

Atstarojumu skaits no virsmām šādā telpā vienas sekundes laikā ir nosakāms pēc šādas sakarības:

$$\frac{c}{d'}$$

kur: c – skaņas ātrums, $343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$;
 d' – viļņa brīvais ceļš.

Veicot mērījumus neregulāras formas telpās, tika noskaidrots, ka viļņa brīvo ceļu var izskaitļot pēc šādas sakarības:

$$d = \frac{4V}{S}, \quad (6.3.)$$

kur: V – telpas tilpums;

S – telpas virsmu kopējais laukums.

Ja telpā ir sasniegts akustiskais līdzsvars un tiek izslēgts skaņas avots, tad telpas skaņas enerģija samazinās ar katru atstarojumu (6.1. att.) atbilstoši izteiksmei:

$$D(n) = D'(1-a)^n, \quad (6.4.)$$

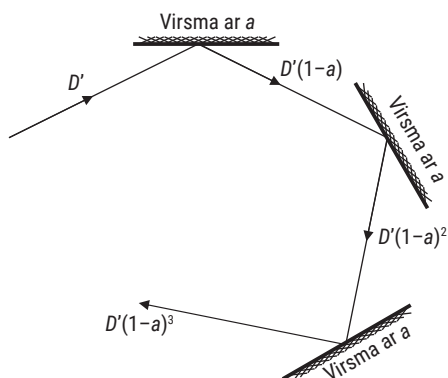
kur: D – līdzsvara stāvokļa enerģijas blīvums pirms izslēgšanas;

n – atstarojumu skaits;

a – vidējais absorbcijas koeficients.

Veicot matemātiskus formulas pārveidojumus, iegūstam sakarību, kas raksturo spiediena līmeņa samazinājuma ātrumu:

$$\Delta SPL = -\frac{10cS}{4V} \lg(1-a). \quad (6.5.)$$



6.3. att. Skaņas viļņa ceļš un enerģijas blīvuma izmaiņas.

6.3. SABINES FORMULA

Formula tiek saukta tās autora vārdā. Par telpas reverberācijas laiku sauc laika posmu, kurā skaņas spiediena līmenis krītas par **60 dB**, respektīvi, tas samazinās **1000** reizes.

Telpas reverberācijas laiku var aprēķināt pēc šādas izteiksmes:

$$T_{60} = \frac{0,161V}{S_1 \cdot \alpha + S_2 \cdot \alpha + \dots + S_n \cdot \alpha_n}, \quad (6.6.)$$

kur: S_n – konkrētās virsmas laukums;

α_n – konkrētās virsmas absorbcijas koeficients;

V – telpas tilpums.

Katru atstarojošo laukumu reizina ar tā absorbcijas koeficientu un visus reizinājumus sasummē. Absorbcijas koeficienta α lielums ir atkarīgs no frekvences, tāpēc reverberācijas laiku vēlam aprēķināt pie dažādām frekvencēm. Parasti ir pietiekami ar oktāvu rindu: **125-250-500-1000-2000-4000 Hz**.

6.4. ABSORBCIJA GAISĀ

Lielās telpās, kur skaņa veic garu ceļu, ir jāņem vērā absorbcija gaisā. Tā pazemina reverberācijas laiku. Absorbcija gaisā būtisku ietekmi izraisa frekvenču diapazonā virs **1 kHz**. Ja runājam par absorbciju gaisā, tad ir arī jāievēro gaisa relatīvā mitruma un temperatūras ietekme.

Sabines formula šajā gadījumā izskatās šādi:

$$T_{60} = \frac{0,161V \cdot t^\circ}{S_1 \cdot \alpha_1 + S_2 \cdot \alpha_2 + \dots + S_n \cdot \alpha_n + 4 \cdot m \cdot V}, \quad (6.7.)$$

kur: S_n – konkrētās virsmas laukums;

α_n – konkrētās virsmas absorbcijas koeficients;

t° – vides temperatūra, °C;

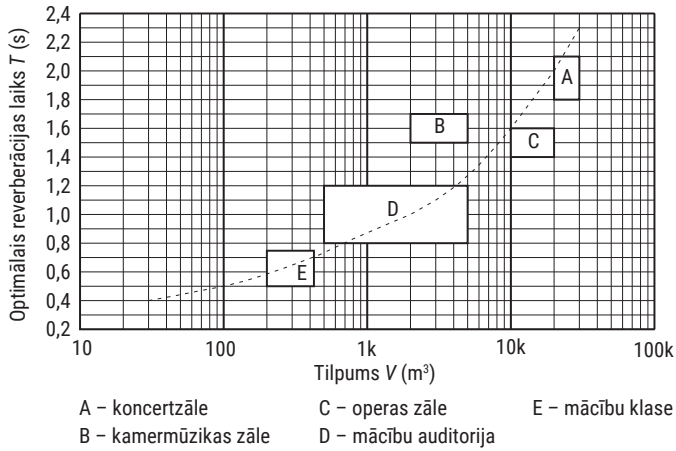
V – telpas tilpums;

m – gaisa vājinājuma konstante, atkarīga no temperatūras un relatīvā mitruma.

Gaisa vājinājuma konstantes vērtības pie nemainīgas temperatūras, bet mainīgiem mitruma līmeņiem apkopotas 6.1. tabulā.

6.1. tabula

relatīvais mitrums, %	Temperatūra, °C	m pie 2000 Hz	m pie 4000 Hz	m pie 6300 Hz	m pie 8000 Hz
30	20	0,0122	0,0411	0,0937	0,1431
50	20	0,0092	0,0258	0,0577	0,0896
70	20	0,0088	0,0208	0,0437	0,0671



6.4. att. Telpas tilpums un ieteicamais reverberācijas laiks.

Optimālais reverberācijas laiks dažādas nozīmes telpām redzams 6.4. attēlā.

Ieteicamais reverberācijas ilgums:

A – koncertzāle: 1,8–2,1 s;

B – kamermūzikas zāle: 1,5–1,7 s;

C – operas zāle: 1,4–1,6 s;

D – mācību auditorija: 0,8–1,2 s;

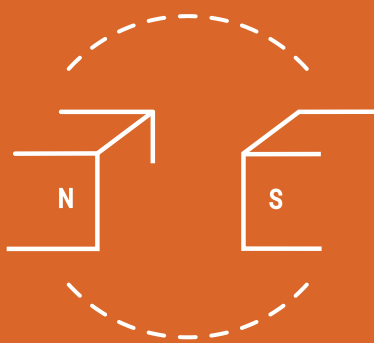
E – mācību klase: 0,5–0,8 s.



ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅĀM

1. Kā sauc telpas īpašību spēt saglabāt skaņas enerģiju?
2. Ar ko raksturojas līdzsvara stāvoklis skaņa telpā?
3. Kāpēc koncertierakstus neveic bezatbalss kamerā?
4. Kādu akustisko lauku sauc par difūzu?
5. Kāda ir Sabine's formula un ko tā parāda?
6. Kas ir lielums T_{60} ?
7. Kāpēc dažāda lietojuma telpām ir nepieciešams dažāds reverberācijas laiks?

ELEKTROMEĀNISKIE PĀRVEIDOTĀJI



07

- 7.1. Elektromehānisko pārveidotāju iedalījums
- 7.2. Elektromehānisko pārveidotāju apvēršamība
- 7.3. Dinamiskā analogija



Atmiņas un prāta treniņam

Kad mēs mērām, ierakstām, vai reproducējam skaņu, tad vēlamies laikā lineāri konvertēt elektrisko signālu ekvivalentā akustiskajā vai arī pretēji – akustisko signālu elektriskajā. Šim nolūkam izmanto elektroakustiskos pārveidotājus. Lielākajā daļā pārveidotāju enerģijas pārnese ir svārstības.

Tātad elektroakustiskās ierīces var izmantot, gan lai ģenerētu, gan lai uztvertu svārstības, un tālab šos pārveidotājus labāk ir saukt par elektromehāniskajiem pārveidotājiem. Skaņu ģenerē vai uztver ar diafragmu, kura ir pievienota pie skaņas vai svārstību pārveidošanas mehānisma.

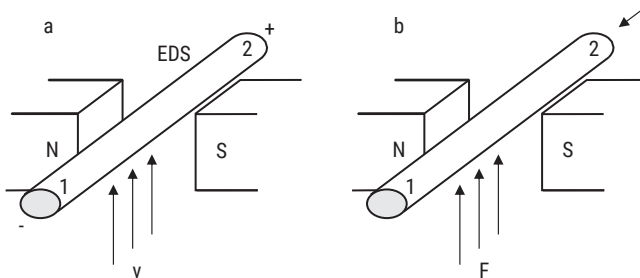
Jebkurā pilnīgā elektroakustiskajā pārraides kanālā vismaz divās vietās izmanto signālu pārveidotājus. Kanāla ieejā, telpā, kur ir skaņas avots, akustisko signālu pārveido elektriskajā. Šim nolūkam izmanto mikrofonus. Kanāla izejā, kur atrodas klausītājs, elektrisko signālu pārveido akustiskajā, izmantojot skaļruņus.

Abi minētie pārveidotāji ir salikti pārveidotāji, un katrs veic divas funkcijas. Mikrofons vispirms akustisko signālu pārveido mehāniskajā un pēc tam mehānisko signālu – elektriskajā. Tādi paši procesi notiek skaļrunī, tikai pretējā virzienā.

Ir daži izņēmumi, kuros notiek tikai viens pārveidošanas process. Piemēram, skaņu plašu atskaņotājs mehānisko signālu uzreiz pārveido elektriskajā, *CD* atskaņotājs optisko signālu pārveido elektriskajā.

Vienkāršots kustīgas spoles pārveidotājs redzams 7.1. att. Attēlā a vadītājs atrodas pastāvīgā magnētiskajā laukā. Ja vadītājs pārvietojas augšup ar ātrumu v , tad tajā inducējas *EDS* un veidojas potenciālu starpība, kā rezultātā vadītāja gals 2 kļūst pozitīvs.

Savukārt, ja magnētiskajā laukā novietotam vadītājam pievada strāvu (7.1. att. b) tā, ka tā plūst no gala 2 uz 1, tad mijiedarbības rezultātā vadītājs pārvietojas augšup, tajā pašā virzienā, kā attēlā a.



7.1. att. Vadītājs pastāvīgā magnētiskajā laukā.

7.1. ELEKTROMEĀNISKO PĀRVEIDOTĀJU IEDALĪJUMS

Atkarībā no funkcionālā uzdevuma elektromehāniskos pārveidotājus iedala motoriskajos un ģeneratoriskajos.

Pie motorisko pārveidotāju grupas ir attiecināmi skaļruņi, kur elektrisko signālu, tātad arī jaudu, pārveido mehāniskajā enerģijā.

Savukārt pie ģeneratorisko pārveidotāju grupas ir attiecināmi pārveidotāji, kuri mehānisko signālu un tātad arī tā jaudu, pārveido elektriskajā.

Šāds process notiek mikrofonā. Lai gan pārveidotāju darbība ir atšķirīga, šo pārveidotāju uzbūve nav principiāli atšķirīga. Viena un tā pati ierīce var darboties gan kā mikrofons, gan kā skaļrunis. Tādēļ ar jēdzieniem *motoriskais* un *ģeneratoriskais* pārveidotājs, sapratīsim elektromagnētisko pārveidotāju darba režīmus.

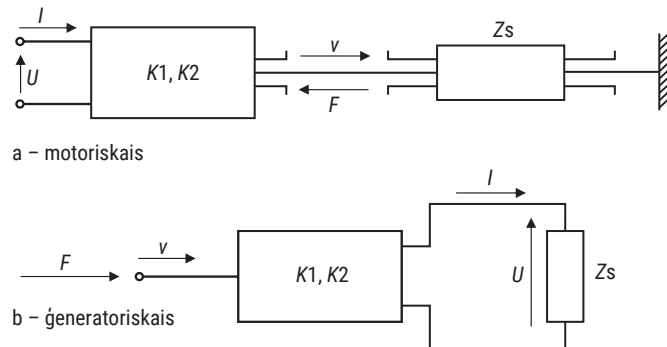
Pārveidotājam pievadīto un tā atdoto jaudu abās pusēs nosaka divi mainīgi lielumi. Elektriskajā pusē tas ir spriegums U (V) un strāva I (A), savukārt mehāniskajā pusē tas ir spēks F (N) un ātrums v (m/s). Visi šie lielumi ir laikā mainīgi un vienkāršākajā veidā tos var aprakstīt ar sin funkciju.

Vispārīgā veidā pārveidotājus attēlosim kā ierīces ar spailēm sprieguma U un strāvas I pievadīšanai un elektriskās slodzes pieslēgšanai, un ar bezinerces, nedeformējamiem stieņiem mehāniskā spēka un ātruma pievadīšanai vai arī mehāniskās slodzes pievienošanai, 7.2. att.

Ja motoriskajam pārveidotājam pieslēdz spriegumu, ķēdē plūst noteikta strāva un izejā rada mehānisko ātrumu v , kas savukārt uz ārējās slodzes rada sev pretēji vērstu reakcijas spēku F .

Ja ģeneratoriskajam pārveidotājam pieliek spēku F , tas saņem noteiktu ātrumu v , radot izejā strāvu I , kas savukārt uz ārējās slodzes pretestības rada strāvai pretēji vērstu spriegumu U .

Attēlā redzams, ka pārveidotāju ieejā, kur uzņem jaudu, sprieguma un strāvas, kā arī spēka un ātruma virzieni ir vienādi, t.i., to fāzes sakrīt, bet pretējā



7.2. att.
Elektromehāniskie pārveidotāji:
a - motoriskais pārveidotājs; b - ģeneratoriskais pārveidotājs.

pusē, kur jauda tiek noņemta, sprieguma un strāvas, kā arī spēka un ātruma virzieni ir pretēji, t.i., ar pretējām fāzēm.

Bieži vien fāžu sakarības ir vienīgais kritērijs, pēc kura var noteikt, vai pārveidotājs dotajā vidē jaudu atdod vai uzņem. Ja, piemēram, akustiskajā laukā atrodas skaļrunis un tam svārstās difuzors, tad vēl nevar apgalvot, ka tas videi atdod jaudu. Difuzors jaudu var arī uzņemt, ja tas darbojas mikroфона režīmā.

Abi gadījumi atšķirsies vienīgi ar fāzes nobīdi starp difuzoram pielikto spēku un tā kustības ātrumu. Situācija ir vēl sarežģītāka, ja starp mainīgajiem lielumiem pastāv kāda cita fāzes nobīde, piemēram, 90°. Tādā gadījumā skaļrunis viena pusperioda laikā atdod jaudu apkārtējai videi, bet otrā pusperioda laikā šo pašu jaudu saņem no vides atpakaļ.

Viena no svarīgākajām prasībām elektroakustikā izmantotajiem pārveidotājiem ir, lai tie pārraidītajam signālam neradītu jūtamus nelineāros kropļojumus. Tāpēc pārveidotājus cenšas izveidot tā, lai sakarības starp visiem četriem mainīgajiem lielumiem U , I , F , v ar pietiekamu tuvinājumu atbilstu lineāriem vienādojumiem. Tad pārveidotāju var raksturot ar četriem koeficientiem: Z_E , Z_M , $K1$, $K2$, bet vienādojumus var uzrakstīt šādi:

$$U = I \cdot Z_{E+V} \cdot K1 \text{ (V), motoriskais režīms – skaļrunis.} \quad (7.1.)$$

$$F = v \cdot Z_M + I \cdot K2 \text{ (N), ģeneratoriskais režīms – mikroфons.} \quad (7.2.)$$

Lielumus $K1$ un $K2$ sauc par elektromehāniskās saites koeficientiem. $K1$ raksturo pārveidotāja ģeneratorisko (mikroфона) režīmu, bet $K2$ – motorisko (skaļruņa) režīmu.

Katrs no mainīgajiem U un F ir divu argumentu funkcija. Lai noskaidrotu atsevišķo koeficientu nozīmi, jāizvēlas tādi režīmi, kuros viens no argumentiem vienāds ar nulli. Pieņemot $v = 0$, no vienādojuma (7.1.) iegūstam:

$$Z_E = \left(\frac{U}{I} \right)_{v=0}. \quad (7.3.)$$

Noteikums $v = 0$ apzīmē nekustīgu, t.i., nobremzētu pārveidotāja izeju. Tātad koeficients Z ir pārveidotāja elektriskā ieejas impedance nobremzētā režīmā. Pieņemot $I = 0$, no vienādojuma (7.2.) iegūstam:

$$Z_M = \left(\frac{F}{v} \right)_{I=0}. \quad (7.4.)$$

Z_E ir attiecināma uz ģeneratoriskajiem pārveidotājiem – mikroфoniem un Z_M ir attiecināma uz motoriskajiem pārveidotājiem – skaļruņiem.

Impedance Z ir pilnā pretestība un ar to raksturo slodzi. Maiņstrāvas gadījumā tai ir komplekss raksturs:

$$\text{induktivitātei: } Z_L = j\omega L = j2\pi fL;$$

$$\text{kapacitātei: } Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j2\pi fC};$$

līdzstrāvas gadījumā $Z = R$.

Apkopojot iepriekšējo, var teikt, ka ar saites koeficientu un impedanču palīdzību raksturo pārveidotāju darbību. Proti, ģeneratoriskā pārveidotāja gadījumā tiek parādīts, kā tiek iegūts spriegums U un motoriskā pārveidotāja gadījumā redzams, kā rodas spēks F . Attiecību starp spēku un tā radīto ātrumu spēka pielikšanas punktā sauc par mehānisko pretestību.

Noteikums $I = 0$ apzīmē elektriski nenoslogotu sistēmu, respektīvi, tukšgaitu. Tātad koeficients Z_M apzīmē pārveidotāja mehānisko impedanci tukšgaitā. Līdzīgā veidā iegūstam:

$$K1 = \left(\frac{U}{v} \right)_{I=0} = K_{EM}, \frac{V \cdot s}{m} \quad (7.5.)$$

un

$$K2 = \left(\frac{F}{I} \right)_{v=0} = K_{ME}, \left(\frac{N}{A} \right). \quad (7.6.)$$

7.2. ELEKTROMEĀNISKO PĀRVEIDOTĀJU APVĒRŠAMĪBA

Pētījuma uzmanības vērts ir jautājums, vai elektromehāniskās saites koeficienti $K1$ un $K2$ ir savstarpēji neatkarīgi, vai arī starp tiem pastāv kāda sakarība, Parasti apvēršamiem pārveidotājiem $K1 = K2$. Ja kāds no šiem koeficientiem ir vienāds ar nulli, tad šāds pārveidotājs nav apvēršams.

Atkarībā no fizikālā darbības principa pārveidotāji var būt dažādi. Bieži lieto induktīvos jeb elektrodinamiskos, kapacitatīvos jeb elektrostatiskos, pjezoelektriskos, retāk magnetostrīktīvos un citus.

Induktīvajam pārveidotājam elektrodzinējspēku, t.i., spriegumu tukšgaitā nosaka pēc Faradeja indukcijas likuma:

$$(u)i = 0 = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (7.7.)$$

un līdz ar to

$$K1 = \left(\frac{U}{v} \right) \cdot I = 0 = \left(\frac{u}{v} \right) \cdot i = 0 = - \frac{d\Phi}{vdt} = - \frac{d\Phi}{dx}, \frac{Wb}{m} \text{ vai } \frac{V \cdot s}{m}, \quad (7.8.)$$

kur: dx – strāvas vadītāja pārvietojums (m);

v – pārvietošanās ātrums (m/s);

$d\Phi$ – ar strāvas vadītāju saķēdētās magnētiskās plūsmas izmaiņa (Wb).

Elektrodinamisko spēku, kas rodas nekustīgā, t.i., nobremzētā vadītājā, nosaka pēc šādas izteiksmes:

$$(F)v = 0 = i \frac{d\Phi}{dx}, \quad (7.9.)$$

no kurienes

$$K2 = \left(\frac{F}{i}\right)v = 0 = \frac{d\Phi}{dx}. \quad (7.10.)$$

No izteiksmēm (7.8.) un (7.10.) iegūstam induktīvo pārveidotāju apvēršamības likumu:

$$K1 = -K2, \text{ V}\cdot\text{s/m vai N/A}. \quad (7.11.)$$

Homogēnā magnētiskajā laukā

$$|K1| = |K2| = \frac{\Phi}{x} = B \cdot I, \text{ T}\cdot\text{m}, \quad (7.12.)$$

kur B – magnētiskā indukcija, T;

l – vadītāja garums magnētiskajā laukā, m.

Izteiksmē (7.11.) abās pusēs vienādības zīmei ir lielumi ar dažādām dimensijām. Tas norāda, ka šo dimensiju fizikālie pamati ir identiski. Arī salīdzinot izteiksmes (7.8.) un (7.10.), redzams, ka mērvienību vēbers var interpretēt gan kā voltsekundi, gan kā ņūtonmetru uz ampēru. ņūtonmetrs ir darba mērvienība, kas identiska džoulam un, dalot to ar ampēru, iegūstam voltsekundi.

Kapacitatīvajiem pārveidotājiem apvēršamību var pierādīt, izmantojot iespēju izteikt vienu un to pašu elektriskā lauka intensitāti divējādi – gan ar sprieguma atkarību no pārvietojuma, darbojoties noteiktam lādiņam q , gan arī ar elektrostatiskā spēka atkarību no lādiņa pie noteikta attāluma x :

$$\frac{du}{dx} \cdot q = \text{const} = \frac{dF}{dq} \cdot x = \text{const}. \quad (7.13.)$$

Nemainīgs lādiņš q nozīmē, ka strāva i ir nulle; tāpat arī nemainīga koordināte x nozīmē, ka ātrums v ir nulle. Izsakot $dx = vdt$ un $dq = idt$ iegūstam:

$$\frac{du}{v \cdot dt} \cdot i = 0 = \frac{df}{i \cdot dt} \cdot v = 0. \quad (7.14.)$$

Pārrakstot vienādojumu operatoru formā un aizstājot $\frac{d}{dt}$ ar operatoru $p = \sigma + j\omega$, iegūstam:

$$p \left(\frac{U}{v}\right) \cdot I = 0 = p \left(\frac{F}{I}\right) \cdot v = 0. \quad (7.15.)$$

Salīdzinot to ar izteiksmēm (7.5.) un (7.6.), iegūstam apvēršamības likumu kapacitatīvajiem pārveidotājiem:

$$K1 = K2, \frac{\text{V}\cdot\text{s}}{\text{m}} \text{ vai } \frac{\text{N}}{\text{A}}. \quad (7.16.)$$

Atšķirībā no induktīvajiem pārveidotājiem kapacitatīvo pārveidotāju elektromehāniskās saites koeficienti ir ne tikai skaitliski vienādi, bet vienādas ir arī to zīmes.

Stacionārajā režīmā, t.i., sinusoidālām svārstībām operatora p vietā iespējams likt $j\omega$. Tādā gadījumā, izmantojot izteiksmes (7.5.), (7.6.), (7.13.) un (7.15.), iegūstam kapacitatīvo pārveidotāju elektromehāniskās saites koeficientus:

$$K1 = \frac{1}{j\omega} \cdot \frac{du}{dx} \cdot q = \text{const} \quad (7.17.)$$

un

$$K2 = \frac{1}{j\omega} \cdot \frac{dF}{dq} \cdot x = \text{const} . \quad (7.18.)$$

Izteiksmēm (7.17.) un (7.18.) ir raksturīgs dalītājs $j\omega$. Tas nozīmē, pirmkārt, ka kapacitatīvajos pārveidotājos spriegums pret ātrumu un tāpat spēks pret strāvu ir nobīdīti fāzē par 90° , otrkārt, elektromehāniskās saites koeficienti nav konstanti, bet gan atkarīgi no frekvences. Pēdējais apstākļi jāņem vērā, konstruējot kondensatora mikrofonus.

Visiem elektromehāniskajiem pārveidotājiem piemīt svarīga īpašība – reizinājums $K1 \cdot K2$ vienmēr ir negatīvs. Induktīvajiem pārveidotājiem tas ir tāpēc, ka $K1$ un $K2$ ir ar pretējām zīmēm, bet kapacitatīvajiem pārveidotājiem tāpēc, ka $K1$ un $K2$ ir imagināri lielumi.

Pjezoelektrisko pārveidotāju darbību raksturo ar elektromehāniskās saites koeficientiem, kas ir līdzīgi kapacitatīvo pārveidotāju koeficientiem. Tātad arī pjezoelektriskajiem pārveidotājiem $K1 = K2$, pie tam abi koeficienti ir imagināri.

7.3. DINAMISKĀ ANALOĢIJA

Daudzos gadījumos dažādi procesi elektriskās, mehāniskās un arī citās fizikālās vidēs attēlojami ar analogām matemātiskām izteiksmēm. Piemēram, līdzīgas struktūras ir vienādojumiem (7.1.) un (7.2.), kā arī Ņūtona dinamikas likumam:

$$F = m \left(\frac{dv}{dt} \right). \quad (7.19.)$$

Salīdzinājumā ar Oma likumu induktīvajā ķēdē:

$$u = L \left(\frac{di}{dt} \right). \quad (7.20.)$$

Minētie piemēri var noderēt par pamatu analogijas fiksēšanai starp spriegumu u un spēku F , induktivitāti L un masu m , strāvu I un ātrumu v utt.

Ja analoģu kompleksu izdotos izvērst pietiekami plaši, daudzos gadījumos kļūtu iespējams vienkāršot sarežģītu fizikālu sistēmu analīzi un aprēķinus, izmantojot citā fizikālā vidē zināmās likumsakarības. Noteiktu ieguvumu varētu dot mehānisko sistēmu pārveidošana analogos elektriskajos slēgumos.

Nenoliedzot analoģijas būtību, daži autori matemātisko izteiksmes līdzību uzskata tikai par formālu sakritību, taču, ja izteiksmju sakritība ir tik daudzveidīga, ka spēj veidot sistēmu, analoģijas principam meklējams arī fizikālais pamats.

Sarežģījumus rada tas apstākļi, ka analoģijas princips nav viennozīmīgs. Piemēram, Ņūtona likumam (7.19.) līdzīga ir ne vien izteiksme (7.20.), bet arī kondensatora uzlādēšanas formula:

$$i = C \left(\frac{du}{dt} \right). \quad (7.21.)$$

Salīdzinot izteiksmes (7.19.) un (7.21.), redzams, ka spēka analogs šai gadījumā ir strāva, masas analogs – kapacitāte utt. Acīmredzot iespējams sastādīt ne vienu vien analoģijas sistēmu. Lai novērstu neskaidrības, izdibināsim analoģijas veidošanas pamatus. Visām mūs interesējošām sistēmām kopīgs fizikāls lielums ir jauda un arī darbs kā jaudas integrālis. Uzskatīsim jaudu par visu sistēmu kopīgo pamatlaielumu analoģu veidošanai.

Fizikālas sistēmas, kurās var pastāvēt jauda, saucim par dinamiskām sistēmām. Analoģiju tātd meklēsim tikai dinamiskām fizikālām sistēmām. Elektrotehnikā jauda ir noteikta ar divu lielumu – sprieguma un strāvas – reizinājumu:

$$P = u \cdot i, W. \quad (7.22.)$$

Izteiksmes labo pusi pareizināsim ar $K2$ un izdalīsim ar $K1$. Zīmes neievērosim, jo tās raksturo tikai iedarbības virzienu un šajā gadījumā kopējo jaudu neiespaido. Izmantojot sakarības (7.5.) un (7.6.), iegūstam:

$$P = u \cdot i \cdot \frac{|K2|}{|K1|} = F \cdot v. \quad (7.23.)$$

Jaudas lielums nav atkarīgs no reizinātāju kārtības, tāpēc iespējami divi analoģu veidošanas paņēmieni. Piekārtojot spriegumam u spēku F un strāvai i ātrumu v , iegūstam analoģu sistēmu, ko saucim par pirmā veida analoģiju.

Ja turpretim spriegumam piekārto ātrumu un strāvai spēku, iegūstam otrā veida analoģiju. Izteiksme (7.20.), piemēram, ir izteiksmes (7.19.) pirmā veida analogs, bet izteiksme (7.21.) – otrā veida analogs.

Citur literatūrā pirmā veida un otrā veida analoģijas sauc par impedances un admitances analoģijām.

Jebkuram pārveidojumam no vienas analoģijas uz otru, ir jāievēro šādas prasības:

- vienas analogijas shēmas virknes elementi atbilst otras analogijas shēmas paralēlajiem elementiem;
- pretestības tipa elementi kļūst par vadāmības tipa elementiem; kapacitātes tipa elementi transformējas par induktivitātes tipa elementiem; induktivitātes tipa elementi transformējas par kapacitātes tipa elementiem;
- virknes elementu sprieguma kritumu summa vienā analogijā transformējas par strāvu summu mezgla punktā otrā analogijā.

Literatūrā biežāk sastopama pirmā veida analogija. Tas izskaidrojams ar to, ka vēsturiski pastāvēja uzskats par spriegumu un spēku kā primāriem faktoriem, kas it kā rada sekundāros procesus – strāvu un ātrumu. Fizikāli tam nav pamatojuma, jo tikpat labi var arī uzskatīt, ka primāra strāva rada uz pretestības sekundāru sprieguma kritumu, bet ātrums uz mehāniskās pretestības – spēku.

Priekšstats par spriegumu kā primāru faktoru izveidojies tikai tādēļ, ka ikdienas dzīvē sprieguma avoti ir sastopami biežāk nekā strāvas avoti. Pirmā veida analogija ir ērta tādēļ, ka savstarpēji atbilstošie lielumi uzrāda zināmu vienveidību, piemēram, elektriskās pretestības analogs ir mehāniskā pretestība, akustiskās kapacitātes analogs – elektriskā kapacitāte utt. Ir autori, kas uzskata, ka otrā veida analogijai ir vairākas būtiskas priekšrocības, kuru dēļ var samierināties ar dažām tās dīvainībām, piemēram, par mehāniskās pretestības analogu uzskatot nevis elektrisko pretestību, bet gan vadītspēju un par akustiskās kapacitātes analogu – induktivitāti.

Viena no otrā veida analogijas priekšrocībām ir tā, ka analogiem slēgumiem saglabājas arī analogiska struktūras topoloģija, t.i., paralēliem elektriskajiem slēgumiem atbilst paralēli veidotie mehāniskie savienojumi, bet virknes slēgumiem – savienojumi ķēdītē – virknē. Pirmā veida analogijai nav šādas atbilstības.

Otra priekšrocība ir vēl būtiskāka. Veidojot elektromehānisko pārveidotāju ekvivalentās shēmas, tās vienmēr iznāk atbilstošas otrā veida analogijas struktūrai. Literatūrā, kur elektromehāniskos pārveidotājus aplūko atbilstoši pirmā veida analogijai, autori ir spiesti izmantot divu veidu slēgumus – analogos un ekvivalentās shēmas. Lietojot otrā veida analogiju, minētie slēgumi ir identiski.

Turpmākajā tekstā būs izskaidrota un izmantota pirmā veida analogija, jo literatūrā tā sastopama visbiežāk. Par sprieguma analogu tā tad pieņemsim spēku:

$$u = F. \quad (7.24.)$$

Izteiksmi (7.23.) iespējams pārveidot arī tālāk. Pareizinot un izdalot labo pusi ar virsmas laukumu S , iegūstam:

$$P = \frac{F}{s} \cdot v \cdot S = p \cdot Q, \quad (7.25.)$$

kur $p = \frac{F}{S}$ – spiediens, Pa;

$Q = v \cdot S$ – tilpuma ātrums jeb plūsma, $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$.

Esam ieguvuši jaudu kā divu lielumu reizinājumu jaunā fizikālā sistēmā un sauksim to par akustisko sistēmu, kas var būt divējādi piekārtota elektriskajai sistēmai.



ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅAM

1. Kādas funkcijas ir veicamas elektromehāniskajiem pārveidotājiem?
2. Kāds ir elektromehānisko pārveidotāju iedalījums?
3. Kādus praktiskus elektromehāniskos pārveidotājus jūs zināt?
4. Ko raksturo elektromehāniskās saites koeficienti $K1$ un $K2$?
5. Kas noteic, vai pārveidotāji ir apvēršami?
6. Vai varat nosaukt analogijas piemērus starp elektriskiem un fizikāliem lielumiem?
7. Ko dod mehānisku un akustisko sistēmu pārveidošana elektriskās?
8. Kādas analogijas varat nosaukt?
9. Vai elektrodinamisko skaļruni var izmantot kā mikrofonu?

SLĒGUMU SHĒMAS UN TO KOMPONENTES



08

- 8.1. Shēmu analīzes principi
- 8.2. Akustisko, mehānisko un elektrisko shēmu elementu savietojamība

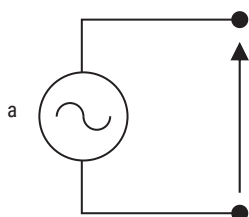


Atmiņas un prāta treniņam

8.1. SHĒMU ANALĪZES PRINCIPI

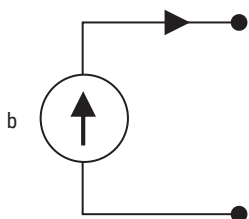
Analizējot akustiskās, mehāniskās un elektriskās iekārtas, tiek izmantotas kopējas slēgumu shēmas un balsta tās analogijas principos. Ideja par elektromehānisko un elektroakustisko analogiju ir balstīta uz līdzīgiem diferenciālvienādojumiem, kuri apraksta mehāniskās, akustiskās un elektriskās parādības.

Analogijas principi ir izmantojami, arī atsevišķi analizējot katru no iekārtām, jo analogija ietver sevī mehānisko un akustisko komponentu attēlošanu ar ekvivalentiem elektriskajiem simboliem, savienojot tos elektriskā shēmā.



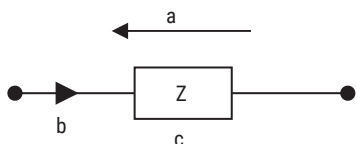
Konstanta krituma (sprieguma) ģenerators, iekšējā impedances ir 0, izslēgts ģenerators ekvivalents īsslēgumam, a tipu nosaka pievienotā slodze, bulta norāda pozitīvo izvadu.

8.1. att. Konstanta lieluma ģenerators.



Konstantas plūsmas (strāvas) ģenerators, iekšējā impedances bezgalīgi liela, izslēgts ģenerators veido pārrāvumu, b tipu nosaka pievienotā slodze, bulta norāda pozitīvo virzienu

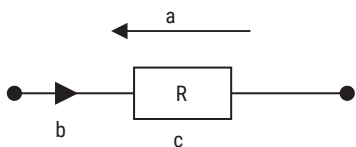
8.2. att. Konstantas plūsmas ģenerators.



impedances tipa elements

$$a = cb$$

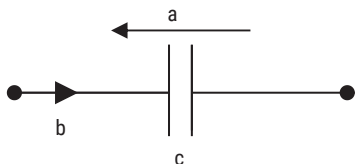
8.3. att. Impedances tipa elements.



pretestības tipa elements

$$a = cb$$

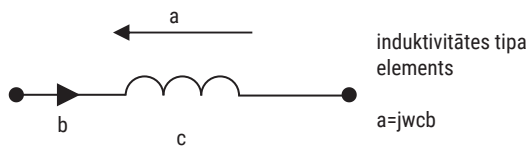
8.4. att. Pretestības tipa elements.



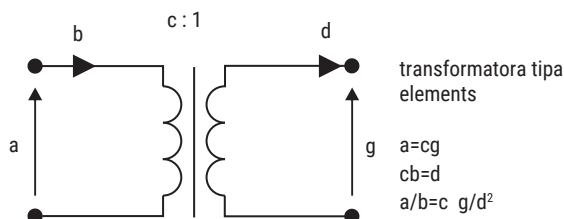
kapacitātes tipa elements

$$a = (1/jwc)b$$

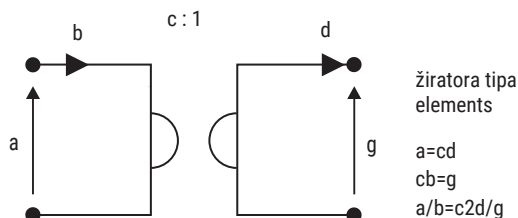
8.5. att. Kapacitātes tipa elements.



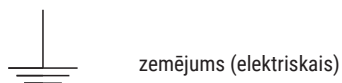
8.6. att. Induktivitātes tipa elements.



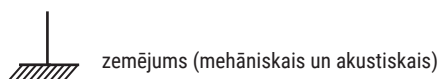
8.7. att. Transformatora tipa elements.



8.8. att. Žiratora tipa elements.



8.9. att. Elektriskais zemējums.



8.10. att. Mehāniskais un akustiskais zemējums.

8.2. AKUSTISKO, MEHĀNISKO UN ELEKTRISKO SHĒMU ELEMENTU SAVIETOJAMĪBA

Bieži praksē elektroakustisko veidojumu analīze sākas ar akustisko un mehānisko komponentu (masa, atsperes, vājinātāji (demferi), virzūļi, tilpumi utt.) savienojanu slēguma shēmā, kura ir pilnīgi līdzīga elektriskajai slēguma shēmai.

Šīs akustiskās vai mehāniskās shēmas pēc tam tiek slēgtas pie elektriskajām shēmām ar transformatoru vai žiratoru starpniecību un atkarībā no pētāmā pārveidotāja tipa tiek izvēlētas atbilstošas elektromehāniskās enerģijas pārveidošanas metodes. Tā rezultātā pētāmo iekārtu pārstāv elektriskā slēguma

shēma ar tai raksturīgiem elementiem un apzīmējumiem, un izpēte un analīze tiek veikta, balstoties uz atbilstošu elektrisko slēgumu teoriju.

Lai elektriskais slēgums veiksmīgi pārstāvētu mehānisko vai akustisko iekārtu, pētnieki B. Gehlshojs (*Gehlshøj*) un L. Beraneks (*Baranek*) ieteic četrus kritērijus:

- izmantojot šo metodi, ir jāspēj veidot slēguma shēmu, vizuāli izpētot iekārtu;
- ir jāspēj veikt manipulācijas, kuras ļauj kombinēt elektriskos, mehāniskos un akustiskos elementus vienotā slēguma shēmā;
- ir jā saglabā katra shēmas elementa identitāte, lai bez pūlēm varētu atpazīt spēku, spriegumu, masu, induktivitāti utt.;
- metodei ir jāizmanto pazīstami elektrisko slēgumu simboli un šo slēgumu regulēšanas metodes.

Turpmākajā izklāstā aplūkosim elektriskās shēmas raksturojošos lielumus un to analogus mehāniskajās un akustiskajās sistēmās.

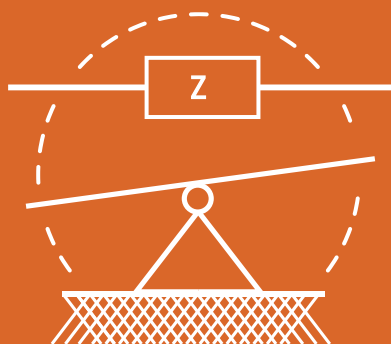


ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅĀM

1. Kādus populārākos mehānisko un akustisko sistēmu ekvivalentos elektriskos simbolus varat nosaukt?
2. Kādas prasības jāievēro, lai elektriskais slēgums veiksmīgi pārstāvētu mehānisko vai elektrisko sistēmu?
3. Kas ir žirators?

ELEKTROMEĀNISKĀ ANALOĢIJA.

MEĀNISKIE ELEMENTI UN TO ELEKTRISKIE ANALOĢI



09

- 9.1. Mehānisko komponentu attēlojums
- 9.2. Impedance, admittance un kustīgums
- 9.3. Mehāniskā impedance un kustīgums
- 9.4. Mehāniskā pretestība
- 9.5. Mehāniskā elastība
- 9.6. Masa
- 9.7. Sviras
- 9.8. Ģenerators
- 9.9. Jaudas izteiksmes



Atmiņas un prāta treniņam

9.1. MEHĀNISKO KOMPONENŠU ATTĒLOJUMS

Tas ir pašsaprotami izmantot elektrisko slēgumu principus un komponentes, attēlojot mehāniskās un akustiskās sistēmas, jo mēs intuitīvi varam izmantot elektrisko slēgumu analīzes pieredzi.

Lai to paveiktu, ir jāatrod analogas komponentes rezistoriem, kapacitātēm, induktivitātēm, transformatoriem utt. Pie tam ir jāizdomā grafiski simboli šādām analogijām un arī paņēmieni, kā vienkārši un ātri konvertēt reāli strādājošu mehānisku konstrukciju darbaspējīgā analogā un pretēji.

Var šķīst vienkārši spēkam F kā analogu pieņemt spriegumu e un ātrumam u strāvu i . Prakse apliecina, ka vienkāršāk ir mērīt spriegumu e un ātrumu u , nekā strāvu i un spēku F , jo tad ir nepieciešams slēgumā veikt izmaiņas, lai ievietotu attiecīgu mērpārveidotāju.

Tātad tīri intuitīvi un arī praktiski, vienkāršāk ir salīdzināt spriegumu e un ātrumu u .

9.2. IMPEDANCE, ADMIDANCE UN KUSTĪGUMS

Mainsprieguma slēgumos impedance Z ir komplekss lielums un tas raksturo sprieguma un strāvas savstarpējo attiecību. Līdzīgi ir akustikā un mehānikā, kur ar impedanci tiek definēta savstarpēji saistītu lielumu – spēka F un lineārā ātruma u – savstarpējās attiecības sistēmas konkrētā izvēlēta punktā. Vspārīgā veidā to izteic vienādojums:

$$Z = R + jX, \quad (9.1.)$$

kur R ir reālā daļa un jX imaginārā daļa, un tās attiecīgi tiek sauktas par rezistivitāti un reaktivitāti.

Mehānikā un akustikā impedancei inversu lielumu sauc par kustīgumu M (*mobility*):

$$\frac{1}{Z} = M. \quad (9.2.)$$

Savukārt elektrotehnikā impedancei inverss lielums tiek saukts par admītanci. Turpmākajā izklāstā tiks izmantoti abi nosaukumi. Kompleksā formā admītances un kustīguma formula ir šāda:

$$\frac{1}{Z} = Y = G + j \cdot B, \quad (9.3.)$$

kur reālo daļu G sauc par *vadītspēju* un imagināro jB par *uzņēmību*. Mērvienība ir S – *sīmens*.


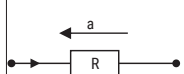
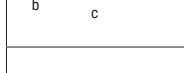
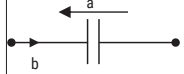
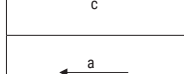
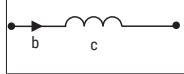
Reālās un imaginārās daļas vietā attiecīgi var lietot jēdzienus amplitūda un fāze. Impedance, admittance un kustīgums ir frekvenču atkarīgi, kompleksi lielumi.

Akustikas un mehānikas kontekstā ar Z_0 apzīmē vispārīgu impedanci, kas raksturojas kā skaņas spiediena attiecība pret daļiņu ātrumu bezgalīgā plakanā viļnī.

Tiek lietoti arī šādi apzīmējumi:

- Z_S – skaņas lauka impedance – skaņas spiediena attiecība pret daļiņu ātrumu noteiktā virzienā vidē izvēlētajā punktā, mērvienība ir $N \cdot s/m^3$. Šī mērvienība tiek saukta arī par reilu ($rayls = N \cdot s/m^3$);

9.1. tabula

	Elektriskā shēma	Mehāniskā shēma	Mehāniskā shēma	Akustiskā shēma	Akustiskā shēma	
elements		Impedances analogija	Admittances analogija	Impedances analogija	Admittances analogija	
a		F	u	p	U	
b		u	F	U	p	
		$c = R$	$c = R_M$	$c = \frac{1}{R_M} = Y_M$	$c = R_A$	$c = \frac{1}{R_A} = Y_A$
		$c = C$	$c = C_M$	$c = M_M$	$c = C_A$	$c = M_A$
		$c = L$	$c = M_M$	$c = C_M$	$c = M_A$	$c = C_A$
		$c = Z_E = e/i$	$c = Z_M = \frac{F}{u} = \frac{1}{Y_M}$	$c = Y_M = \frac{u}{F} = \frac{1}{Z_M}$	$c = Z_A = \frac{p}{U} = \frac{1}{Y_A}$	$c = Y_A = \frac{U}{p} = \frac{1}{Z_A}$

E – maiņspriegums (V);

I – maiņstrāva (A);

C – kapacitāte (F);

R – pretestība (Ω);

Z_E – impedance (S);

Y_M – mehāniskā admittance (mobilitāte) (m/N·s)

Z_M – mehāniskā impedance (N·s/m);

R_A – akustiskā pretestība (N·s/m);

M_A – akustiskā masa (kg/m^2);

U – ātrums (m/s);

F – spēks (N);

p – spiediens (Pa);

U – tilpuma ātrums (m^3/s);

L – induktivitāte (H);

Z – impedance (S);

R_M – mehāniskā pretestība (N·s/m);

M_M – mehāniskā masa (kg);

C_M – mehāniskā elastība (m/N);

C_A – akustiskā elastība (m^2/Pa);

Z_A – akustiskā impedance (N·s/m²);

Y_A – akustiskā admittance ($m^2/N \cdot s$).

- Z_A – akustiskā impedance – skaņas spiediena attiecība pret tilpuma ātrumu normālā virzienā pret izvēlētu virsmu akustiskā sistēmā, mērvienība ir $(N \cdot s/m^5)$;
- Z_M – mehāniskā impedance – spēka attiecība pret ātrumu izvēlētā punktā mehāniskā sistēmā, mērvienība ir $(N \cdot s/m)$. To sauc arī par mehānisko omu.

Tabulā redzami elementu a , b un c tipi elektriskajās, mehāniskajās un akustiskajās shēmās.

9.3. MEHĀNISKĀ IMPEDANCE UN KUSTĪGUMS

Izvēli, attēlot mehānikas elementus ar impedanci vai admitanci, nosaka izdevīgums. Proti, mehānisko sistēmu, pēc iespējas vienkāršāk ir jāattēlo ar ekvivalentu analogo elektrisko shēmu, kuru tad var analizēt, balstoties uz elektrisko ķēžu analīzes teoriju. Ir jāpiezīmē, ka ideja par impedanci mehāniskajās sistēmās Z_M ir balstīta uz attiecību:

$$Z_M = \frac{F}{u}. \quad (9.4.)$$

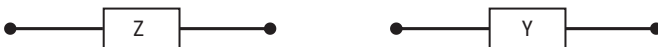
Savukārt admitanci Y_M , (kustīgumu M), noteic attiecība:

$$Y_M = \frac{u}{F}. \quad (9.5.)$$

Lai pēc iespējas vienkāršāk mehānisko sistēmu aizvietotu ar ekvivalentu elektrisko shēmu, šī mehāniskā sistēma jāattēlo ar mehānisko shēmu, kuras pamatā ir kustīguma M analogija. Tas tāpēc, ka šī pieeja visciešāk atbilst elektrisko slēgumu analīzes principiem. Proti, spriegumu ir vienkārši mērīt elektriskajā slēgumā, un līdzvērtīgi ir mērīt ātrumu mehāniskā sistēmā. Spēks F tādējādi atbilst strāvai.

Rezultātā, tā saukto kustīguma analogu, ir nepieciešams pārvērst impedances analogā, izmantojot iepriekš aplūkoto dualitāti. Šī konvertācija parasti ir nepieciešama, lai pārveidotāja mehānisko sistēmu sasaistītu kopā ar tā elektrisko un akustisko sistēmu. Tā rezultātā jauniegūtā vienkāršotā sistēma lieto vienas fizikālās vides jēdzienus un parametrus.

Piemēram, ir iespējams izskaitļot pārveidotāja izstaroto akustisko jaudu kā funkciju no pievadītā sprieguma. Impedances un kustīguma simboli ir identiski (9.1. att.).



9.1. att. Impedances Z un kustīguma Y simboli.

9.4. MEHĀNISKĀ PRETESTĪBA

Analogiski elektriskajai pretestībai ir iespējams definēt mehānisko pretestību:

$$R_M = \frac{F}{u}. \quad (9.6.)$$

Mehānisko pretestību reprezentē slāpētāji-demferi, absorberi. Mehāniskā pretestība konkrētajā slēgumā mehānisko enerģiju pārvērš siltumā. Ir aprēķināmi jaudas zudumi:

$$P = R_M \cdot u^2 \text{ (W)}. \quad (9.7.)$$

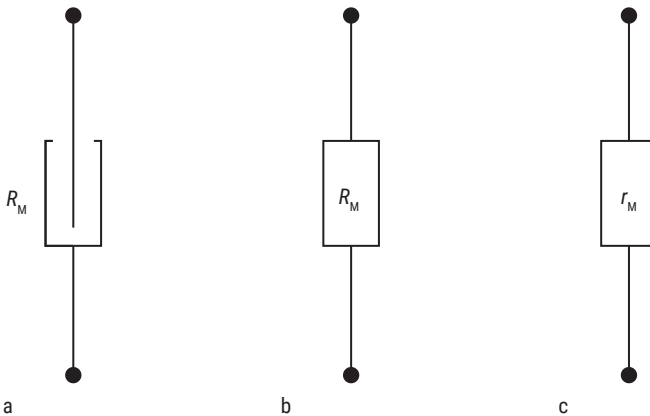
Mehāniskās pretestības simbolam ir zināma līdzība ar citu rezistīvo komponentu simboliem.

Viens no šādiem simboliem, kas atspoguļo viskozo berzi, ir hidrauliskais vai pneimatiskais slāpētājs.

Reālo lietojumu varam sastapt analogajā mērtehnikā, kur mērāmais lielums ir vibrējošs vai mainās lēcienveidā (gaisa, šķidruma spiediens). Grafiskie simboli redzami 9.2. attēlā.

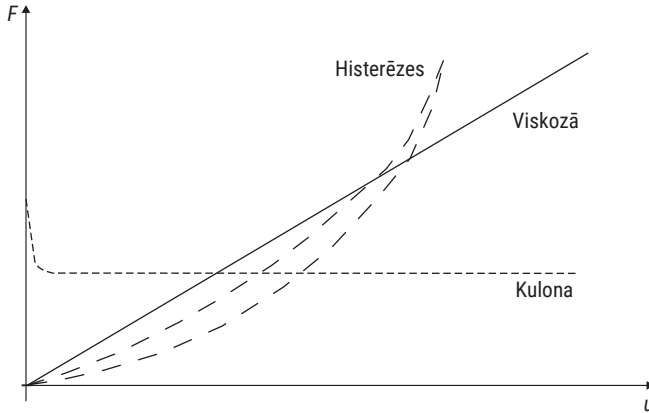
Mehāniskās pretestības inversais lielums elektroakustikā ir admitance r_M un to noteic pēc šādas izteiksmes:

$$r_M = \frac{1}{R_M}. \quad (9.8.)$$



- a – mehāniskā slāpētāja simbols
- b – mehāniskā pretestība impedances analogijas slēgumā
- c – mehāniskā pretestība kustīguma (mobility) analogijas slēgumā

9.2. att. Mehāniskie viskozās slāpēšanas elementi.



9.3. att. Dažādi slāpēšanas veidi.

Mehānisko admitanci lieto mehāniskā kustīguma analogijas slēgumos, bet mehānisko pretestību lieto impedances analogijas slēgumos. Abos gadījumos grafiskais attēlojums ir identisks (9.2. att. b un c).

Ir triju veidu slāpēšanas un lielākajā daļā mehānisko sistēmu tās visas darbojas vienlaikus. Tās ir viskozā, histerēzes un Kulona (*Coulomb*) slāpēšana. Dažādu slāpētāju darbības raksturlielnes redzamas 9.3. attēlā.

Viskozo slāpēšanu dažkārt sauc arī par lineāro slāpēšanu. Šajā slāpēšanas veidā tiek izmantota plāna eļļas kārtiņa vai arī neliela gaisa sprauga. Slāpēšanai nepieciešamais spēks ir tieši proporcionāls ātrumam, un šinī gadījumā slāpēšana notiek tieši tāpat, kā izmainot pretestību elektriskajā ķēdē.

Histerēzes slāpēšana asociējas ar slāpēšanas mehānismu pašā ķermenī un ar to ir saistīti elastīgie materiāli, tādi kā plastmasa, gumija. Praksē tā ir lineāra, bet frekvenču atkarīga slāpēšana.

Kulona slāpēšana ir sausās berzes rezultāts. Tās lielums ir atkarīgs no spēka, ar kādu ķermenis spiež uz virsmu.

Praktiskais piemērs ir vijoles, čella vai kāda instrumenta lociņa un stīgas mijiedarbība. Parasti šī sausā berze nav ilgstoša, taču bieži aplūkota audio procesu analīzē.

9.5. MEHĀNISKĀ ELASTĪBA

Atsperei ir raksturīga mehāniskā pretestība, to saspiežot vai stiepjot ar spēku F . Tas saistīts ar atsperes materiāla īpašībām. Spēka lielumu noteic šāda izteiksme:

$$F = k_M \cdot x, \quad (9.9)$$

kur k_M – atsperes konstante – stingums, kas raksturo materiālu;
 x – summārā koordināte – pārvietojums.

Inversss lielums stingumam ir elastība:

$$C_M = \frac{1}{k_M}. \quad (9.10.)$$

Strādājot ar impedancēm, mūs vairāk interesē sakarība F/u nekā F/x . Zinot, ka ātrums u ir ceļa atvasinājums pēc laika, iegūstam šādu sakarību:

$$u = j\omega x. \quad (9.11.)$$

Atsperes mehānisko impedanci un kustīgumu noteic šādas sakarības:

$$Z_M = \frac{F}{u} = \frac{1}{j\omega C_M}, \quad (9.12.)$$

kur $\omega = 2\pi f$;

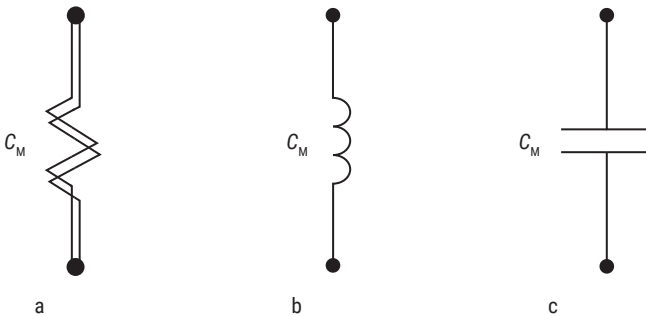
C_M – mehāniskā elastība;

$$Y_M = \frac{u}{F} = j\omega C_M.$$

Mehāniskās atsperes grafiskais attēls redzams 9.4. attēlā.

Modelējot atsperi ar analogijām, ir svarīgi saprast, ka vīto atsperi ir grūti attēlot kā vienotu elementu. Tam ir vairāki iemesli. Mehānisko atsperi ir grūti piespiest kustēties tikai vienā plaknē, Tītās atsperes materiāla garums atšķiras no atsperes garuma. Jebkurai reālai atsperai ir masa. Ja pieņemam, ka masa sadalās vienmērīgi pa atsperes garumu, tad atsperes efektīvā masa ir **1/3** no atsperes masas.

No impedances skatupunkta ir pieņemama šāda aproksimācija. Visu atsperi var sadalīt masas un atsevišķu atsperu vienībās. Tādā veidā ir iespējams labāk attēlot izkliedētās masas un vītās atsperes spoles tinuma mehānisko darbību. Bieži, veicot analīzi, katras vienības garumu izvēlas mazāku par **1/16** daļu no atsperes viļņa garuma. Ar šo lielumu mēs vēl sastapsimies pie akustikas elementu analīzes.



a – mehāniskās atsperes simbols
 b – mehāniskā atbilstība kustīguma analogijas slēgumos
 c – mehāniskā atbilstība impedances analogijas slēgumos

9.4. att. Mehāniskā atsperi un tās analogijas.

9.6. MASA

Materiāla gabalam, kuru izvēlamies kā diskrētu masas vienību, iekšējās viļņu svārstības ir pārāk niecīgas, lai tās ņemtu vērā. Mēs parasti vēlamies, lai pārveidotajos masa kustētos tikai vienā virzienā, tas ir, taisnvirzienā, un lai nebūtu rotācijas kustību.

Elektrodinamisko skaļruņu difuzoram to parasti var sasniegt bez pūlēm, jo difuzors ir nostiprināts – centrēts – divās vietās. Ir daži skaļruņi, kuros skaņas izstarojums iespaido viļņu kustību, te parādās rotācijas kustība. Lielākajai daļai elektrodinamisko mikrofonu un dažiem elektrodinamiskajiem skaļruņiem ir tikai viena stiprinājuma – centrējuma – vieta. Te var parādīties rotācijas kustība, kuru nav iespējams modelēt ar analogijas palīdzību.

Masu raksturo inerce. Lai paātrinātu masu, ir jāpieliek spēks.. Aplūkosim tikai pārveidošanas procesa kustību, jo tā ir raksturīga lielākajai daļai elektroakustisko pārveidotāju kustīgajām detaļām. Tā kā ātrums ir paātrinājuma sekas, ir nepieciešams spēks, lai to izraisītu. Zinot, ka paātrinājums ir ātruma atvasinājums pēc laika, Ņūtona kustības likums mūsu gadījumā iegūst šādu formu:

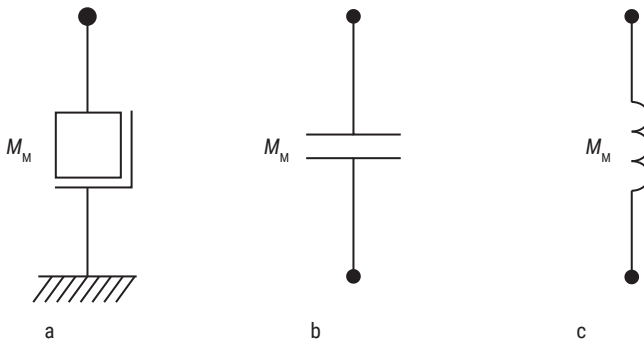
$$F = M_M \cdot a = j\omega M_M \cdot u, \quad (9.13.)$$

kur: a – paātrinājums, m/s^2 ;
 M_M – mehāniskā masa.

No izteiksmes redzams, ka ātrums u un spēks F nav sinfāzi. Mehāniskās masas M_M impedances un kustīgums ir šādi:

$$Z_M = \frac{F}{u} = j\omega M_M; \quad (9.14.)$$

$$Y_M = \frac{u}{F} = \frac{1}{j\omega M_M}. \quad (9.15.)$$



- a – mehāniskās masas simbols
- b – mehāniskā masa kustīguma analogijas slēgumos
- c – mehāniskā masa impedances analogijas slēgumos

9.5. att. Mehāniskās masas elementu simboli.

Mehāniskās masas grafiskais attēlojums dots 9.5. attēlā.

Mehāniskās masas grafiskā elementa augšējā daļa ar ātrumu u pārvietojas attiecībā pret zemi. Šinī gadījumā tā ir attēlota kā leņķveida elements, kura ātrums ir nulle. Vidējais (b) simbols ir tāds pats, kā elektriskajās shēmās pieņemtais kapacitātes simbols.

Kapacitāte ir izdevīgs lielums, konvertējot mehāniskā kustīguma slēgumus uz elektriskajiem slēgumiem.

9.7. SVIRAS

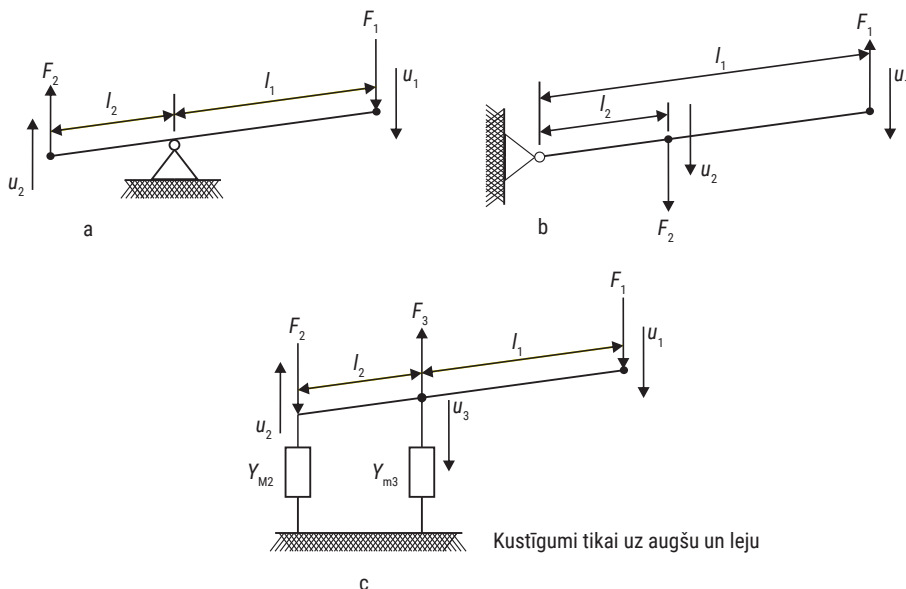
Sviras tiek izmantotas, lai mehāniskajos slēgumos mainītu spēka un ātruma attiecību. Mehāniskās sviras īpašības ir identiskas transformatora īpašībām elektriskajos slēgumos. Atšķirība ir tikai tāda, ka svira veic statiskus pārvietojumus, bet transformators veic darbības ar mainīgu signālu.

Audio slēgumu gadījumā tas ir maiņspriegums.

Apskatīsim trīs sviru lietojuma izpildījuma veidus (9.6. att.).

Sistēmas līdzsvara stāvokli 9.6. att. a un b raksturo šāds vienādojums:

$$F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2. \quad (9.16.)$$



9.6. att. Sviras izpildījuma piemēri;

a – stiprinājums starp sviras galiem; b – stiprinājums sviras galā; c – peldoša svira.

Ja kustības ir nelielas, tad no ģeometrijas ir redzams:

$$\frac{u_1}{l_1} = \frac{u_2}{l_2}. \quad (9.17.)$$

Tagad var definēt impedances un kustīguma attiecības:

$$Z_{M1} = \frac{F_1}{u} = \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 \cdot Z_{M2}; \quad (9.18.)$$

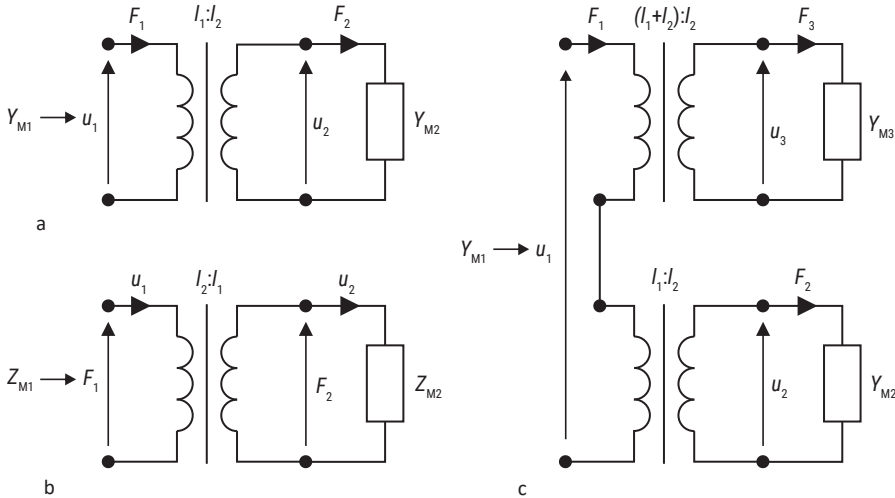
$$Y_{M1} = \frac{u_1}{F_1} = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 \cdot Y_{M2}. \quad (9.19.)$$

No šiem vienādojumiem redzams, ka tie ir tādi paši kā ideālam impedances tipa transformatoram ar transformācijas attiecību $\frac{l_2}{l_1}$ un kustīguma tipa gadījumā ar attiecību $\frac{l_1}{l_2}$.

Nelielu kustību gadījumā peldošo sviru c var analizēt, izmantojot superpozīcijas metodi. Izmantojot tos pašus, ko iepriekš, kustības balansa un ģeometrisko attiecību principus un lietojot superpozīciju, iegūstam kustīguma attiecības:

$$Y_{M1} = \frac{u_1}{F_1} = \left(\frac{l_1+l_2}{l_2}\right)^2 \cdot Y_{M3} \cdot \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 \cdot Y_{M2}. \quad (9.20.)$$

Sviras efektīvo masu var aprēķināt, izmantojot tos pašus principus, kas tika izmantoti, analizējot atsperes efektīvo masu. Sviras stiprinājuma starp galiem gadījumā, dalītās masas M_{M1} un M_{M2} ir attiecināmas uz sviras plecu garumiem:



9.7. att. Sviru elektriskie analogi:

a – vienkāršas sviras kustīguma analogs; b – vienkāršas sviras impedances analogs; c – peldošas sviras kustīguma analogs.

$$M_{M1} = \frac{M_M}{3} \cdot \frac{l_1}{l_1 + l_2}, \quad (9.21.)$$

$$M_{M2} = \frac{M_M}{3} \cdot \frac{l_2}{l_1 + l_2}, \quad (9.22.)$$

kur M_M – sviras kopējā masa.

Triju veidu sviru impedances un kustīguma analogija ar elektrisko slēgumu redzama 9.7. attēlā.

9.8. ĢENERATORS

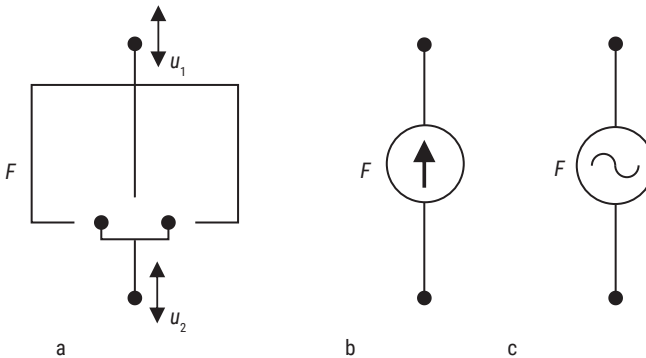
Aplūkosim divus mehāniskos ģeneratorus. Tie ir nemainīga spēka un nemainīga ātruma ģeneratori. Vienkāršu konstanta spēka ģeneratoru var modelēt ar elektrodinamiskā pārveidotāja mehānismu (skaļrunis). Ideālam elektrodinamiskajam pārveidotājam iekšējā impedance ir nulle. Spēka ģeneratoru grafiskie apzīmējumi doti 9.8. attēlā.

Bulta apļa iekšpusē nozīmē, ka iekšējā impedance ir bezgalīga, savukārt vilnis nozīmē, ka iekšējā impedance ir nulle.

Nemainīga spēka ģenerators attēlots 9.9. att. a. Analogiju gadījumā spēka ģenerators grafiskā simbola izvēli noteic izmantotās analogijas veids. Ja tā ir kustīguma analogija, tad simbols b, savukārt impedances analogijas gadījumā tas ir simbols c.

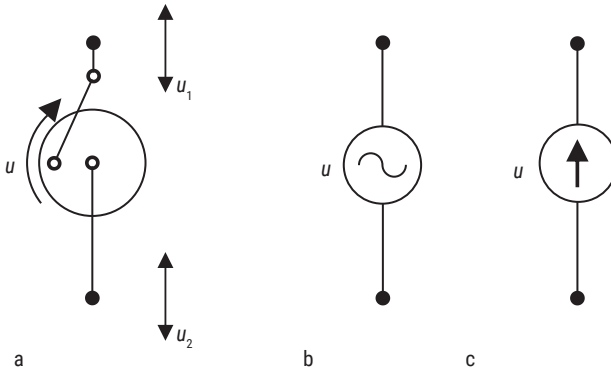
Vienkāršotu nemainīga ātruma ģeneratoru mehānikā var modelēt ar dzinēju, kas aprīkots ar kloķa-klaņa mehānismu (akustikā – mikrofonis) 9.9. attēls. Dzinēja griešanās nav atkarīga no slodzes.

Analogiju gadījumā spēka ģenerators grafiskā simbola izvēli noteic izmantotās analogijas veids. Ja tā ir kustīguma analogija, tad simbols b, savukārt impedances analogijas gadījumā tas ir simbols c.



a – spēka ģenerators simbols mehānikā
 b – spēka ģenerators simbols kustīguma analogijā
 c – spēka ģenerators simbols impedances analogijā

9.8. att. Spēka ģeneratoru simboli.



- a – ātruma ģenerators simbols mehānikā
 b – ātruma ģenerators simbols kustīguma analogijā
 c – ātruma ģenerators simbols impedances analogijā

9.9. att. Ātruma ģenerators simboli.

9.9. JAUDAS IZTEIKSMES

Mehāniskajos slēgumos izkļaidētās jaudas lielumu noteic *strāvas* lielums caur pretestības elementiem. Tā kā mēs esam ieinteresēti gan impedances, gan kustīguma analogijās, uzrakstīsim, kam ir pielīdzināmi jaudas zudumi impedances analogijā:

$$P_M = R_M \cdot u^2. \quad (9.23.)$$

Savukārt kustīguma analogijā jaudas zudumus noteic šādi:

$$P_M = r_M \cdot F^2, \quad (9.24.)$$

kur: R_M – mehāniskā pretestība;
 r_M – admitance (kustīgums).

Parasti, veicot analīzi, mēs cenšamies distancēties no reālā slēguma un izprast to caur kustīguma analogiju. Šajā gadījumā mehāniskos jaudas zudumus aprēķina pēc analogijas slēguma.



ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅĀM

1. Ko maiņsprieguma elektriskajā ķēdē raksturo impedance?
2. Kas ir rezistivitāte un reaktivitāte?
3. Kam inverss lielums ir admitance?
4. Kas ir mehāniskais oms?
5. Kāds fizikāls lielums raksturo slāpētājus?
6. Kā mijiedarbojas masa un inerce?
7. Kas ir mehānisko sviru analogs elektriskajos slēgumos?

ELEKTROAKUSTISKĀ ANALOĢIJA



10

- 10.1. Akustisko slēgumu elementi
- 10.2. Viļņi caurulēs
- 10.3. Akustiskā impedances
- 10.4. Akustiskā kapacitāte
- 10.5. Akustiskā kapacitāte ar stingru diafragmu
- 10.6. Akustiskā masa
- 10.7. Akustiskā pretestība



Atmiņas un prāta treniņam

10.1. AKUSTISKO SLĒGUMU ELEMENTI

Kad mēs modelējam akustiskos slēgumus, kuri atveido caurules, atveres, diafragmas, difuzorus utt., mēs izmantojam akustiskās analogijas komponentes, lai varētu aprakstīt un izprast slēguma darbību. Akustisko slēgumu elementi ir divportu vai četrportu un tie tiek raksturoti ar akustiskā lauka mainīgajiem lielumiem, tilpuma plūsmu un skaņas spiedienu. Gan mehāniskajiem, gan akustiskajiem veidojumiem ir kopēji slēgumu elementi un ar tiem var attēlot atbilstošas akustiskās komponentes. Piemēram, saspiegts šķidrums vai gāze kādā tilpumā ir atbilstošs akustiskajam slēgumam.

Akustisko slēgumu elementi ir akustiskā elastība, masa, pretestība, transformators un ģenerators. Tā kā akustiskās komponentes veido gāze vai gāzu maisījums, piemēram, gaiss, tad to īpašības ir atkarīgas no temperatūras un statiskā spiediena.

Turpmākajā izklāstā pieņemsim, ka nav statiskās plūsmas. Linearitāte var kļūt problemātiska, kad dinamiskais akustiskais spiediens kļūst vērā ņemama daļa no statiskā spiediena (ap 10^5Pa), piemēram, ja spiediens gaisā ir virs 10^2Pa .

10.2. VIĻŅI CAURULĒS

Nosacījums elektroakustisko slēgumu analogijas tradicionālai izmantošanai ir plakano viļņu izplatība komponentēs. Tomēr viļņi reti izplatās kā plakani viļņi, labāk ir runāt tikai par viļņiem caurulēs.

Viļņi, izplatoties caur mainīga šķērsriezuma traktu, caur atverēm, caur locījumiem, vairs nav plakani viļņi. Par plakano vilni var runāt tikmēr, kamēr akustisko komponentu izmēri nav salīdzināmi ar viļņa garumu.

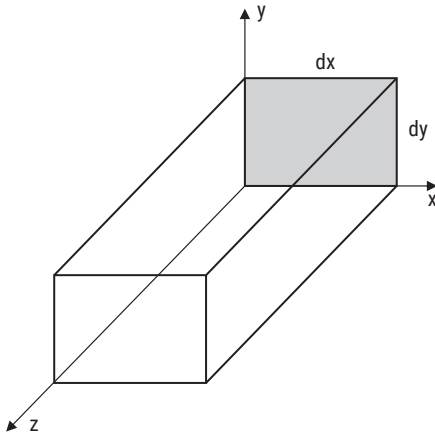
Viļņiem izplatoties caurulē, plakano viļņu augšējo robežu noteic gaisa un caurules sienas impedances attiecība. Gadījumi, kad skaņa izplatās gaisā caurulē, kurai ir stingras sienas (biezsienu metāla caurule) un kad skaņa izplatās ūdenī caurulē, kurai ir mīksta sienas (plānsienu plastmasas caurule), ir ļoti atšķirīgi attiecībā uz robežnosacījumiem.

Lai *tīrs* plakans vilnis izplatītos gaisa vidē, taisnā biezsienu taisnstūrveida šķērsriezuma caurulē ar dimensijām dx un dy , kur $dx > dy$ (10.1. att.), tad tā zemākajai frekvencei ir jābūt:

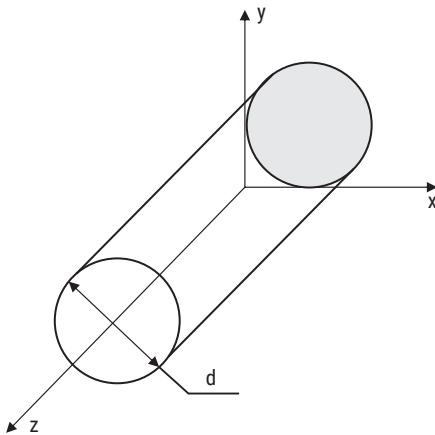
$$f_{\text{lim}} < \frac{c}{2dx}. \quad (10.1.)$$

Savukārt, ja caurules šķērsriezums ir aplis un tās diametrs ir d (10.2. att.), zemākās frekvences lielums ir šāds:

$$f_{\text{lim}} < \frac{c}{1,71 \cdot d}. \quad (10.2.)$$



10.1. att. Caurule ar taisnstūrveida šķērs griezumu.



10.2. att. Caurule ar aplveida šķērs griezumu.

Mēs redzam, ka plakana viļņa izplatībai zemākās frekvences nosacījumi ir aptuveni līdzīgi:

$$d \approx \frac{\lambda}{2}. \quad (10.3.)$$

Zemāko frekvenci bieži vien mēdz saukt arī par nogriešanas frekvenci. Lielākoties caurulē gaiss netiek iesvārstīts ar plakanas virsmas virzuli, bet gan ar konisku vai sfērisku difuzoru. Tas var būt mazāks par caurules šķērs griezuma laukumu, lokans, neregulāras formas utt. Tuvu pie šādām nelīdzēnām virsmām caurulē var tikt ierosinātas augstākas kārtas viļņu modas (plakana viļņa moda parasti tiek saukta par 0-to modu).

Augstākas kārtas modas ir gaistošas (viļņa amplitūda atkarībā no attāluma eksponenciāli samazinās) tik ilgi, kamēr vilnis ir zem nogriešanas frekvences. Ja svārstības neierosina ideāls virzulis, pa caurules šķērs griezumu tiek radīts nevienmērīgs spiediena sadalījums.

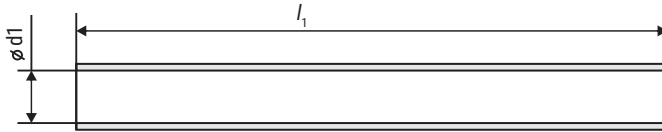
Augstākas kārtas viļņu modas var tikt ierosinātas arī cauruļu locījumu-izliekumu vietās. Ja tiek veidoti cauruļu starpsavienojumi ar atšķirīgiem diametriem, plakana vilnis zūd, jo plūsma netiek uzturēta un virzīta vienmērīga. Šādi starpsavienojumi bieži ir sastopami surdīnēs un citos

skaņas vājinātājos, mikrofonos un skaļruņos, kā arī akustiskajos rezonatoros.

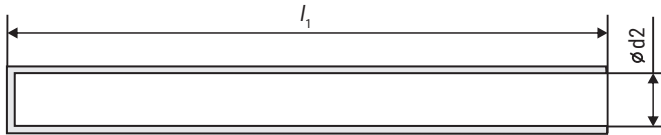
Ļoti maza diametra caurulēs berze gar sieniņām slāpē viļņus. Tievās caurulēs daļiņu ātruma fāze ir nemainīga pa šķērs griezuma laukumu, bet ātrums samazinās, un ātruma izmaiņas caurules garumā raksturo parabolisks vājinājums.

Aplūkosim sakarības, kuras novērojamas taisnās, cilindriskās caurulēs.

Flauta ir cilindrisks mūzikas instruments, kam abi gali ir atvērti (10.3. att.).



10.3. att. Abos galos atvērta caurule.



10.4. att. Vienā galā slēgta caurule.

Savukārt klarnete ir vienā galā slēgts cilindrisks mūzikas instruments (10.4. att.).

Abi šie mūzikas instrumenti ir apmēram vienāda garuma. Klarnetes diametrs ir nedaudz lielāks par flautas diametru, bet tas šoreiz nav būtiski, lai salīdzinātu svārstību procesus abos instrumentos.

Atcerēsimies, ka ģenerēto skaņas viļņu radītais spiediens svārstās ap atmosfēras spiedienu.

Svārstību procesus šajos instrumentos raksturo stāvviļņu diagrammas.

Pārtrauktā līnija attēlo spiediena izmaiņu amplitūdu. Vaļējos galos tās lielums ir tuvu nullei un līdzinās apkārtējās atmosfēras spiedienam. Nepārtrauktā līnija parāda gaisa plūsmas svārstību izmaiņu amplitūdu. Vislielākā tā ir atvērtajos galos, jo gaiss var brīvi plūst iekšā un ārā. Tie visi ir, tā sauktie robežnosacījumi.

10.5. att. redzams, ka pārtrauktā līnija attēlo tikai pusi no pilna *sin* svārstību cikla. Tātad garākais vilnis, kas ievietojas atvārtā caurulē, ir divas reizes garāks par cauruli. Flautas garums ir apmēram 0,6 m, tātad tā spēj radīt vilni ar garumu $\lambda_1 = 2 \cdot l = 1,2$ m. Garākais vilnis nozīmē zemāko no atskaņojamajām notīm un to var aprēķināt:

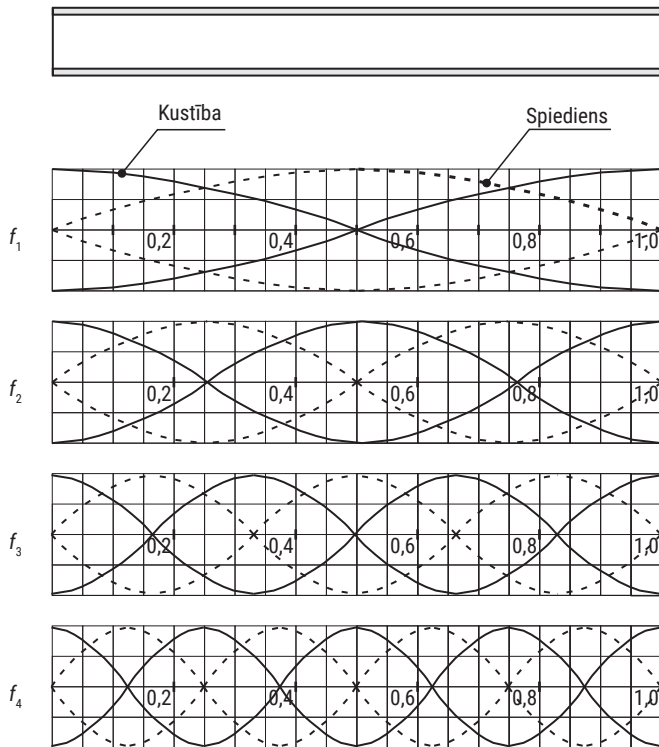
$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{343}{1,2} = 285. \quad (10.4.)$$

Ar nelielu tuvinājumu nošu skalai iegūstam, ka tā ir C notes mazajā oktāvā ar frekvenci 262 Hz. Frekvences f_2, f_3, f_4 ir harmonikas pamatfrekvencei f_1 (t.i. 2-, 3-, 4- augstāki toni):

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{2 \cdot l_1};$$

$$f_2 = f_1 \cdot 2 = \frac{2 \cdot c}{\lambda_1} = \frac{2 \cdot c}{2 \cdot l_1} = \frac{c}{l_1};$$

$$f_3 = 3 \cdot f_1 = \frac{3 \cdot c}{\lambda_1} = \frac{3 \cdot c}{2 \cdot l_1} = \frac{3 \cdot c}{2 \cdot l_1};$$



10.5. att. Stāvviļņi flautā.

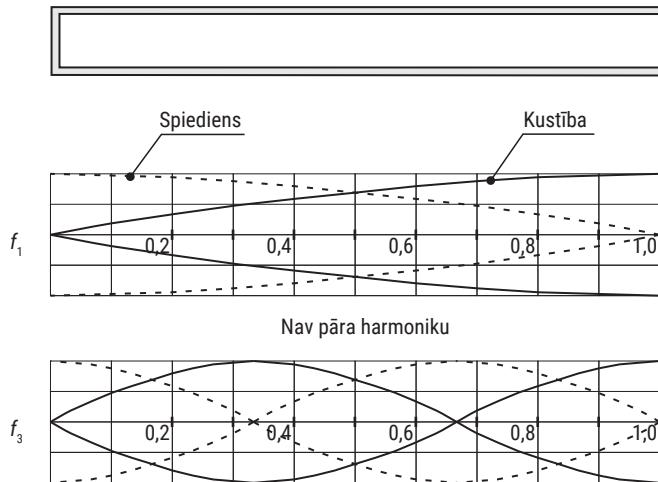
$$f_4 = 4 \cdot f_1 = \frac{4 \cdot c}{\lambda_1} = \frac{4 \cdot c}{2 \cdot l_1} = \frac{2 \cdot c}{l_1};$$

$$f_5 = 5 \cdot f_1 = \frac{5 \cdot c}{\lambda_1} = \frac{5 \cdot c}{2 \cdot l_1}.$$

Pārtrauktā līnija attēlo spiediena izmaiņu amplitūdu. Vaļējā galā tās lielums ir tuvu nullei un līdzinās apkārtējās atmosfēras spiedienam. Savukārt vislielākais spiediens veidojas slēgtajā galā. Nepārtrauktā līnija parāda gaisa plūsmas svārstību izmaiņu amplitūdu. Vislielākā tā ir atvērtais galā, jo gaiss var brīvi plūst iekšā un ārā. Vismazākā amplitūda ir slēgtajā galā. Tie ir minētie robežnosacījumi.

Vienā galā slēgtajā caurulē-klarinetē (10.6. att.) redzams, ka tajā ievietojas tikai $\frac{1}{4}$ no pilna *sin* svārstību cikla. Tātad garākais vilnis, kas ievietojas vienā galā slēgtā caurulē ir četras reizes garāks par cauruli. Zinot, ka klarinetes garums arī ir apmēram 0,6 m, var aprēķināt viļņa garumu $\lambda = 4 \cdot l = 2,4$ m un arī attiecīgi zemāko atskaņojamo toni-noti:

$$f_1 = \frac{c}{\lambda} = \frac{343}{2,4} = 142. \quad (10.5.)$$



10.6. att. Stāvēļņi klarnetē.

Veicot tuvinājumu muzikālajai skalai, nosakām, ka tā ir nots D ar frekvenci 147 Hz. Tā ir gandrīz oktāvu ($2\cdot$) zemāk nekā flautas gadījumā. Attēlā redzams, ka instrumentam nav pāra harmoniku. Ir tikai nepāra – f_3, f_5, f_7, \dots .

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c}{4 \cdot l_1};$$

$$f_3 = 3 \cdot f_1 = \frac{3 \cdot c}{\lambda_1} = \frac{3 \cdot c}{4 \cdot l_1};$$

$$f_5 = 5 \cdot f_1 = \frac{5 \cdot c}{\lambda_1} = \frac{5 \cdot c}{4 \cdot l_1};$$

$$f_7 = 7 \cdot f_1 = \frac{7 \cdot c}{\lambda_1} = \frac{7 \cdot c}{4 \cdot l_1}.$$

10.3. AKUSTISKĀ IMPEDANCE

Akustiskā impedance Z_A veidojas kā attiecība starp spiedienu p un tilpuma ātrumu U caur vienu un to pašu sistēmas virsmu:

$$Z_A = \frac{p}{U}. \tag{10.6}$$

Tilpuma ātrums veidojas no daļiņu ātruma un virsmas laukuma, ja:

- daļiņu ātruma vektors ir paralēls virsmas normālei;
- daļiņu ātrums ir vienāds visos virsmas punktos.

Akustiskā admittance Y_A ir inverss lielums impedancei Z_A :

$$Y_A = \frac{U}{p}. \tag{10.7}$$

Lai elektrisko filtru teoriju varētu izmantot akustisko slēgumu projektēšanā un to izpratnē, ir nepieciešami elektrisko slēgumu elementi, tādi kā kondensators (kapacitāte), spole (induktivitāte), rezistors (pretestība), transformators (vājināšana vai pastiprināšana), kā arī strāvas un sprieguma ģeneratori.

10.4. AKUSTISKĀ KAPACITĀTE

10.4.1. IMPEDANCES ANALOĢIJA

Akustiskā elastība asociējas ar gāzes saspiežamību. Ja gāze, kas ir ieslēgta kādā tilpumā, tiek saspiesta, tad pakāpenisks tilpuma samazinājums paaugstina spiedienu. Tā kā spiediena pieaugums ir saistīts ar temperatūras pieaugumu, tad notiek neliela siltuma apmaiņa starp gāzi un tilpuma sienām, tā rezultātā lēnāki kļūst procesi gāzē.

Akustiskā elastība, kā impedances elements, atbilst elektriskajai kapacitātei.

Akustiskā slēguma impedances izteiksmi var uzrakstīt analogiski, kā elektriskās kapacitātes gadījumā:

$$Z_A(\omega) = \frac{1}{j\omega C_A}, \quad (10.8.)$$

kur C_A ir akustiskā kapacitāte jeb elastība.

Priekšnoteikums, lai aplūkotu slēgta tilpuma impedanci kā viendabīgu elastības elementu, ir modālās uzvedības novēršana skaņas laukam tilpuma iekšpusē. Praksē tas nozīmē to, ka jebkurai slēgta tilpuma dimensijai ir jābūt daudzkārt mazākam par interesējošās skaņas frekvences viļņa garumu.

Tiek pieņemts, ka tilpuma sienas ir ideāli stingras. Vienkāršota šāda tilpuma aproksimācija ir īsa, taisna, galā slēgta caurule (10.7. att.), kas atbilst visām iepriekš minētajām prasībām. Caurules gali ir perpendikulāri caurules garenasij. Pieņemam, ka viļņi, kas tiek pievadīti tilpumam, nāk no plakana, ģenerējoša virzuļa. Virzulis ģenerē viļņus, kas izplatās caurulē x ass virzienā.

Viļņa radīto spiedienu var uzrakstīt šādi:

$$p(x, k) = p_+ \cdot e^{-j k x}, \quad (10.9.)$$

kur: p_+ – pozitīvais vilnis;

k – viļņa numurs;

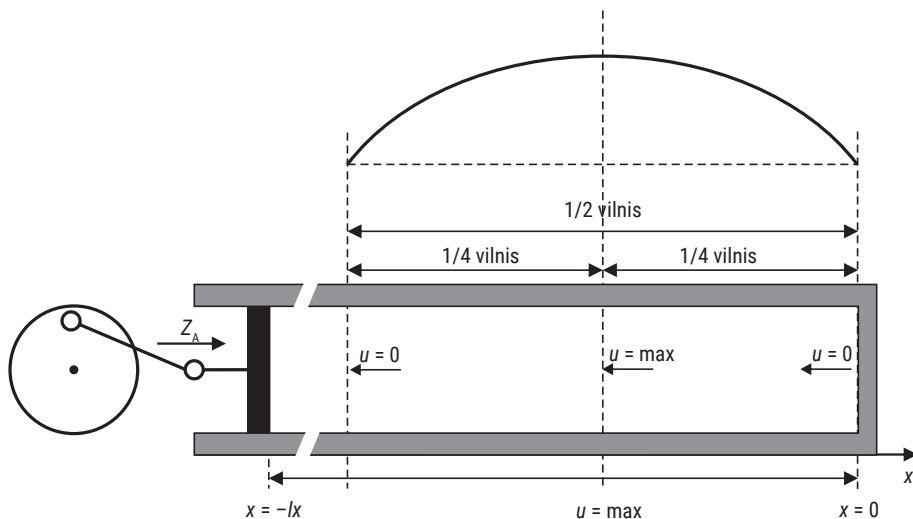
x – attālums.

Savukārt daļiņu ātrumu noteic pēc šādas sakarības:

$$u(x, k) = (p_+ / \rho c) \cdot e^{-j k x}, \quad (10.11.)$$

kur: ρ – gāzes blīvums;

c – viļņa ātrums.



10.7. att. Akustiskās impedances komponente – stingra, slēgta caurule bez zudumiem.

Atstarošanās koeficients no caurules gala $r(\omega) = 1$, jo sienas impedance Z_w ir daudz lielāka par gāzes impedanci:

$$r(\omega) = \frac{Z_w(\omega) - \rho \cdot c}{Z_w(\omega) + \rho \cdot c}. \quad (10.12.)$$

Skaņas spiedienu un daļiņu kustības ātrumu caurulē turp-atpakaļ ejošajiem viļņiem var izteikt šādi:

$$p(x, k) = p_+ \cdot (e^{-jkx} + r(\omega) \cdot e^{jkx}), \quad (10.13.)$$

$$u(x, k) = \frac{p_+}{\rho \cdot c} \cdot (e^{-jkx} - r(\omega) e^{jkx}). \quad (10.14.)$$

Savukārt akustisko impedanci kādā noteiktā attālumā no caurules gala var noteikt ar šādu izteiksmi:

$$Z_A(x, k) = \frac{\rho \cdot c (e^{-jkx} + r(\omega) e^{jkx})}{S \cdot (e^{-jkx} + r(\omega) e^{jkx})}, \quad (10.15.)$$

kur S – caurules šķērsriezuma laukums.

Pieņemot, ka caurules garums ir l un atstarošanas koeficients no gala sienas ir $r(\omega) = 1$, var noteikt akustiskās impedances lielumu ar kādu nākas sastapties ģeneratora virzulum attālumā $x = -lx$:

$$Z_A(-lx, k) = \frac{\rho \cdot c}{j \cdot S} \cdot \text{ctg}(klx). \quad (10.16.)$$

Zinot, ka viļņu numurs k ir:

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (10.17.)$$

varam pārrakstīt impedances izteiksmi:

$$Z_A(-lx, k) = -\frac{j\rho c}{S} \cdot \text{ctg}\left(\frac{2\pi lx}{\lambda}\right) = jX_A, \quad (10.18.)$$

kur X_A – reaktance – impedances imaginārā daļa.

Der atcerēties, ka:

reaktance X piemīt induktivitātei un kapacitātei maiņstrāvas gadījumā. Pretestība piemīt gan līdzstrāvas gadījumā, gan maiņstrāvas gadījumā. Kompleksā lieluma impedances reālo daļu veido pretestība R un imagināro daļu veido reaktance X :

$$R + jX.$$

Ideālai pretestībai R ; $X = 0$ un ideāliem elementiem L un C ; $X = 0$.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

Reaktance attēlota 10.8. attēlā.

Ja caurules garums l ir daudzkārt mazāks par dotās skaņas ar frekvenci ω viļņa garumu λ , ctg izteiksmes virkni var aproksimēt tikai ar dažiem locekļiem bez īpaši lielas summārās kļūdas:

$$\text{ctg}(klx) = klx - \frac{klx}{3} + \frac{(klx)^3}{45} - \dots (|klx|) < \pi. \quad (10.19.)$$

Ja saglabā tikai izteiksmes virknes pirmo locekli, iegūst vēlamu impedances formulējumu:

$$Z_A(\omega) = \frac{1}{j\omega C_A}. \quad (10.20.)$$

Akustisko elastību noteic pēc šādas sakarības:

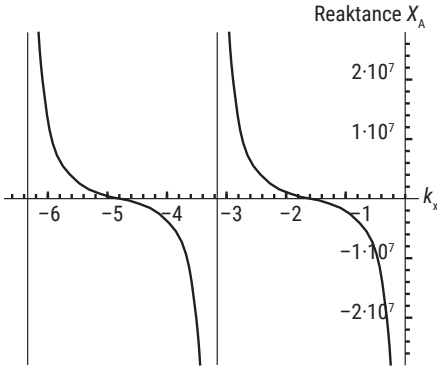
$$C_A = \frac{S \cdot l_x}{\rho \cdot c^2}, \quad (10.21.)$$

kur: S – šķērsgriezuma laukums;

l_x – attālums;

ρ – gāzes blīvums;

c – skaņas ātrums gāzē.



10.8. att. Reaktances $X_A(kx)$ raksturs slēgtā bezzudumu caurulē kā funkcija no kx .

Kamēr gāzes tilpumam V tā lielākā dimensija ir daudzkārt mazāka par, piemēram, $1/16$ no viļņa garuma un tur nav sašaurinājumu, šo tilpumu var uzskatīt par vienu veselu un formai nav nozīmes.

Akustisko elastību izteic šāda izteiksme:

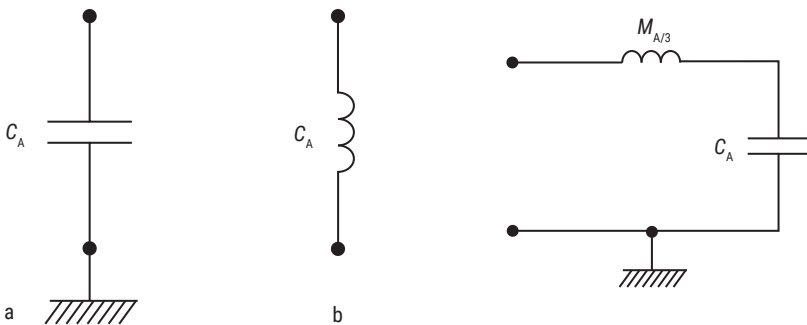
$$C_A = \frac{V}{\rho \cdot c^2}. \quad (10.22.)$$

Akustiskā slēguma elementus impedances analogijas gadījumā attēlo, izmantojot tos pašus, kurus izmanto elektriskajos slēgumos (10.9. att.).

Akustiskā kapacitāte, lietojot akustiskās impedances analogiju, attēlo tilpumā ieslēgta gaisa elastību, un viens no tās termināliem vienmēr ir slēguma zeme. Lai izvairītos no akustiskās kapacitātes viena termināla zemējuma, ir nepieciešams to aizvietot ar mehānisko elastību, piemēram, izmantojot stingru diafragmu.

Ir pamats domāt, ja no ctg izteiksmes virknes saglabā pirmos divus locekļus, tad aproksimācijas kļūda būs mazāka. Ja caurules garums ir mazāks par $\lambda \cdot 1/8$, tad impedances lieluma aproksimācijas kļūda būs mazāka par 5 %. Tagad akustisko impedanci Z_A var formulēt šādi:

$$Z_A(\omega) = \frac{1}{j\omega C_A} + \frac{j\omega M_{A/3}}{3}, \quad (10.23.)$$



10.9. att. Akustiskās elastības simboli:
a – impedances tipa analogija; b – admittances tipa analogija.

10.10. att. Slēgtas caurules impedances reaktīvās daļas precīzāks attēlojums.

kur: M_A – akustiskā masa;

$$M_A = \frac{\rho l x}{S}.$$

Saskaņā ar vienādojumu (10.23.), lai precīzāk attēlotu slēgtas caurules impedances reaktīvo daļu – reaktanci –, ir nepieciešami divi elementi (10.10. att.).

Kā jau iepriekš tika minēts, kapacitātes viens termināls impedances analogijā, aproksimējot Z_A , tiek zemēts.

10.4.2. ADMITANCES ANALOĢIJA

Dažreiz akustisko elastību nākas attēlot admitances analogijā. Zinot, ka admitance ir inverss lielums impedances, iegūstam šādu izteiksmi:

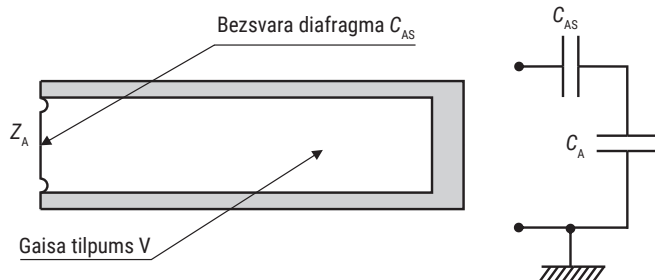
$$Y_A = \frac{1}{Z_A} = j\omega C_A. \quad (10.24.)$$

Jāpiebilst, ka elastībai admitances analogijā ir induktivitātes raksturs, tas ir, tā ir kā mehāniskā atspere. Zīmējot attiecīga slēguma shēmu, izmanto elektriskās induktivitātes grafisko simbolu.

Rezumējot, lai iegūtu precīzāku aproksimācijas rezultātu, jācenšas izmantot pēc iespējas vairāk virknes izteiksmes locekļus.

10.5. AKUSTISKĀ KAPACITĀTE AR STINGRU DIAFRAGMU

Jebkurai tilpumā ieslēgtai gaisa masai akustiskās elastības viens termināls ir zemēts. Lai no tā izvairītos, ir jāatrod variants, kā virknē ieslēgt kapacitāti akustiskās impedances analogijas slēgumā. To iespējams veikt, izmantojot stingru vadāmu diafragmu (vēlams ideālu – bezsvara) ar pēc iespējas zemāku rezonanses frekvenci (10.11. att.).



10.11. att.
Diafragma caurulē.

10.6. AKUSTISKĀ MASA

Akustiskā masa ir saistīta ar gāzes tilpuma inerci. Akustiskā masa ir impedances elements un atbilst induktivitātei elektriskajos slēgumos. Tā ir kompleksa, no frekvences atkarīgs lielums. Akustisko masu var uzskatīt par viendabīgu masas elementu. Mēs vēlamies, lai mums būtu akustiskā slēguma elements, kuram būtu akustiskā impedances, un lai to varētu aprakstīt līdzīgi kā induktivitāti:

$$Z_A(\omega) = j\omega M_A, \quad (10.25.)$$

kur M_A – akustiskā masa ar induktivitātei piemītošām īpašībām.

Tas ir iespējams ar dažiem pieņēmumiem. Ļoti īsa caurulīte ir vienkārša jebkura atvērta tilpuma aproksimācija (10.12. att.).

Pieņemam, ka caurules gala virsma ir perpendikulāra viļņu izplatīšanās virzienam un divi atvērumi ir savstarpēji saistīti ar cauruli. Svārstību viļņus caurulē ģenerē virzulis, kura virsma arī ir perpendikulāra viļņu izplatīšanās virzienam. Virzulis ģenerē viļņus pozitīvā x virzienā.

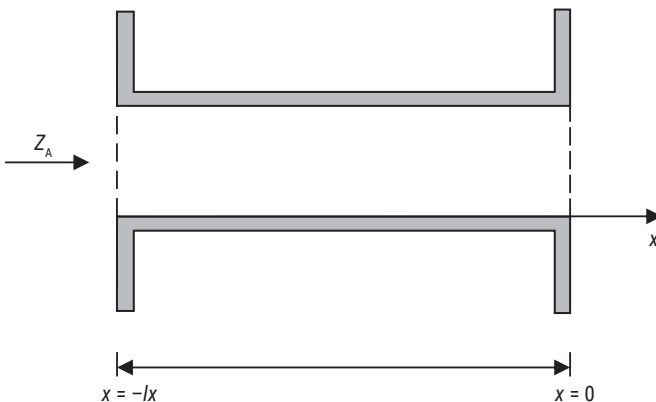
Šāda viļņa spiedienu var aprakstīt šādi:

$$p(x, k) = p_+ \cdot e^{-jkx}. \quad (10.26.)$$

Savukārt gāzes daļiņu ātrumu noteic šāda izteiksme:

$$u(x, k) = \left(\frac{p_+}{\rho \cdot c} \right) \cdot e^{-jkx}. \quad (10.27.)$$

Caurules vaļējam galam ir atstarošanās koeficients $r(\omega)$, kura lielums ir mazāks par vienu, jo vaļējā galā notiek skaņas viļņu izstarošana. Mēs pieņemam, ka caurules galā impedances ir daudz mazāka par impedanci caurulē, tas noved pie tā, ka:



10.12. att. Īsa atvērta caurulīte, kā akustiskās impedances elements.

$$r(\omega) = -1. \quad (10.28.)$$

Skaņas lauku caurulē veido krītošie un atstarotie viļņi:

$$p(x, k) = p_+ \cdot (e^{-jkx} - e^{jkx}), \quad (10.29.)$$

$$u(x, k) = \frac{P_+}{\rho \cdot c} \cdot (e^{-jkx} + e^{jkx}). \quad (10.30.)$$

Akustiskā impedance pie virzuļa virsmas, lūkojoties caurulē, ir:

$$ZA(x, k) = \frac{\rho c (e^{-jkx} - e^{jkx})}{S (e^{-jkx} + e^{jkx})}, \quad (10.31.)$$

kur S – virzuļa gala un caurules šķēsgriezuma laukums.

Pieņemot, ka caurules garums ir lx , var noteikt akustisko impedanci uz virzuļa virsmas, tam pārvietojoties:

$$ZA(-lx, k) = \frac{j\rho c}{S} \cdot \text{tg}(klx). \quad (10.32.)$$

Un iegūstam reaktances izteiksmi:

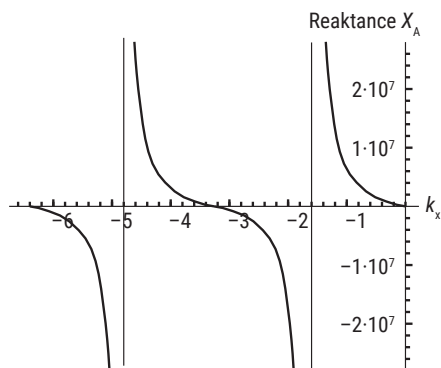
$$Z_A(-lx, k) = \frac{j\rho c}{S} \cdot \text{tg}\left(\frac{2\pi lx}{\lambda}\right) = jX_A. \quad (10.33.)$$

Reaktances X_A grafiskais attēlojums ir dots 10.13. attēlā.

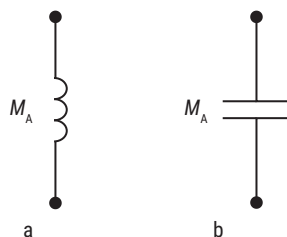
Attēlā redzams, ka impedance caurules galā līdzinās nullei.

Kamēr caurules garums nav salīdzināms ar viļņa garumu λ pie izvēlētās frekvences ω , tg virknes izteiksmes aproksimācijai var paņemt tikai dažus pirmos locekļus, neradot lielu kļūdu:

$$\text{tg}(klx) = klx + \frac{(klx)^3}{3} + \frac{2 \cdot (klx)^5}{15} - \dots (|klx|) < \frac{\pi}{2}. \quad (10.34.)$$



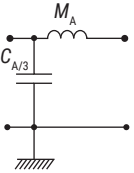

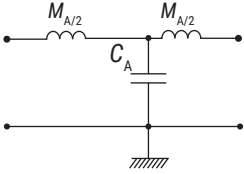

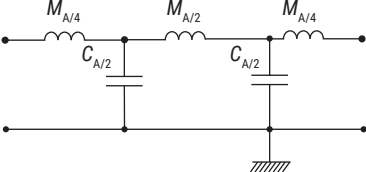

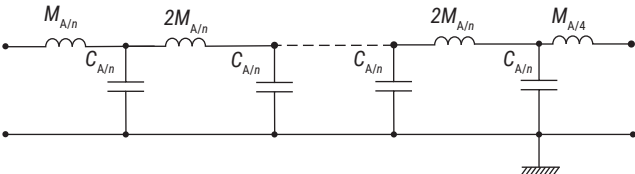

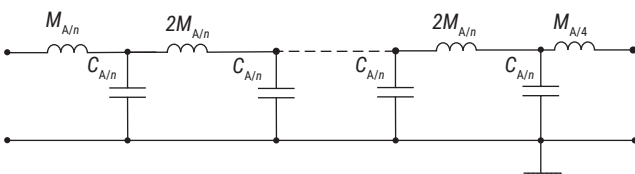
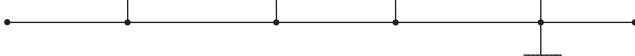


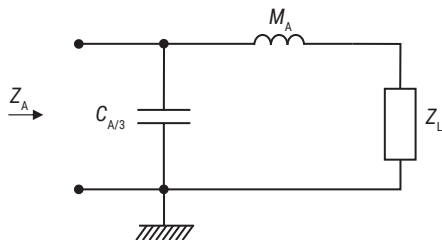
10.13. att. Atvērta caurules reaktance X_A kā funkcija no k_x (šķēsgriezuma laukums $S = 0,0001 \text{ m}^2$, $d = 0,011 \text{ m}$).



10.14. att. Akustiskās masas simboli: a – Akustiskā masa impedances tipa analogijas slēgumos; b – akustiskā masa admittances tipa analogijas slēgumos.

10.1. tabula

Caurules garums	Kļūda	Akustiskā analogija
$l < \lambda/16$	5 %	
		
$l < \lambda/8$	5 %	
		
$l < \lambda/3$	10 %	
		
$l < \lambda$	10 %	
		
$l < n\lambda/4$	10 %	
		
$l < n\lambda/8$	3 %	
		



10.15. att. Atvērtas caurules impedances reaktīvā daļa.

Saglabājot tikai pirmo izteiksmes locekli, iegūstam šādu impedances vienādojumu:

$$Z_A(\omega) = j\omega M_A, \quad (10.35.)$$

kur: M_A – akustiskā masa,

$$M_A = \frac{\rho l x}{S}, \text{ kg/m}^4.$$

Akustisko masu elektroakustiskās impedances analogijas gadījumā grafiski attēlo ar induktivitāti, kā elektroslēgumos (10.14. att.). Akustiskā induktivitāte jeb akustiskā masa ir jāslēdz virknē ar slodzes impedanci Z_L .

Virtnes izteiksmes aproksimācija ir precīzāka, ja ņem divus locekļus. Ja caurules garums ir mazāks par $\lambda \cdot 1/8$, tad aproksimācijas kļūda ir mazāka par 5%.

Virtnes izteiksmes aproksimācija ir precīzāka, ja ņem divus locekļus. Ja caurules garums ir mazāks par $\lambda \cdot 1/8$, tad aproksimācijas kļūda ir mazāka par 5%.

Aprobežojoties tikai ar pirmajiem diviem tg virtnes izteiksmes locekļiem un pieņemot, ka caurules tālajā galā slodzei Z_L ir nulles impedance, iegūstam šādu izteiksmi:

$$Z_A(\omega) = \frac{1}{\frac{j\omega C_A}{3} + \frac{1}{j\omega M_A}}. \quad (10.36.)$$

Akustiskā elastība ir:

$$C_A = \frac{S \cdot l x}{\rho \cdot c^2}. \quad (10.37.)$$

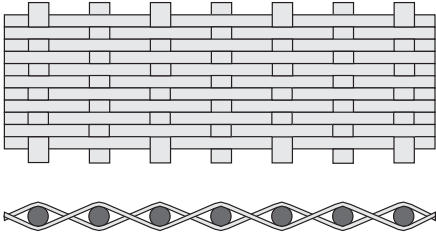
Impedances reaktīvo daļu precīzāk attēlo shēma ar paralēli slēgtiem elementiem (10.15. att.). Slēgumā redzams, ka kapacitātes viens termināls ir zemēts, tāpat kā iepriekš.

10.1. tabulā redzams kļūdas lielums dažādos impedances aproksimācijas gadījumos caurulei ar atvērtiem galiem.

10.7. AKUSTISKĀ PRETESTĪBA

Jaudas zudumu iemesls akustiskajos slēgumos var būt ne tikai izstarošana, bet arī berze un citi. Ir ļoti ērti apskatīt ideju par tilpuma plūsmu caur akustisko pretestību kā vietu, kur ir novērojami zudumi. Skaņas enerģijas absorbcija gaisā ir uzskatāma par pretestību, bet tā kā šie zudumi ir ļoti mazi tiem viļņu garumiem, kurus apskatām, tos var ignorēt.

Akustiskā pretestība ir nepieciešama, lai varētu koriģēt mikrofonu un skaļruņu parametrus un iegūtu vēlamās frekvenču un vājinājuma raksturlīknes.



10.16. att. Metāla stieplu holandiešu pinums ar precīzu akustisko pretestību un mazu induktivitāti.

Reālajā praktiskajā darbībā, lai izveidotu akustisko pretestību, akustiskajos slēgumos izmanto dažādus risinājumus un materiālus: tievas caurulītes un spraugas, audumu un pinumus, kā arī keramiskus materiālus.

Akustiskās pretestības cēlonis ir nevienmērīgā gaisa plūsma, kuru ietekmē šaurās spraugas un materiāla strukturālās īpašības. 10.16. att. redzams kāda pinuma paraugs.

Akustiskajos slēgumos pinumi bieži vien tiek izmantoti kā rezistīvie elementi, to grafiskais attēlojums dots 10.17. attēlā.

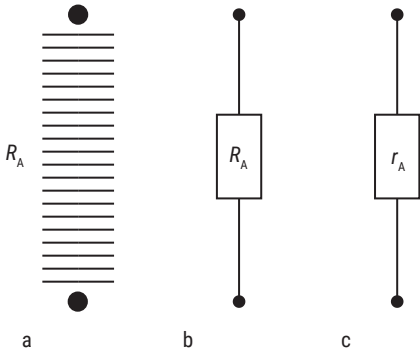
Aplūkosim šauru spraugu un gaisa plūsmu caur to (10.18. att.). Sprauga vai tieva caurulīte ierobežo gaisa plūsmu, un tajā vienlaikus atrodas arī gaisa masa, kas rada akustisko impedanci.

Ja spraugas parametri ir h , b , l_x un $h < 0,003\sqrt{f}$, tās impedance ir:

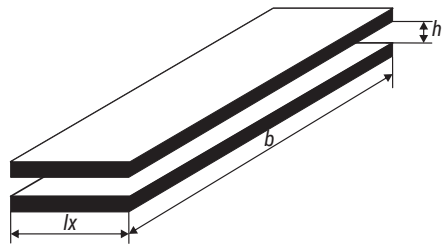
$$Z_A(\omega) = R_A + jX_A = \frac{12\eta l_x}{h^3 b} + \frac{j\omega(\sigma \rho l_x)}{5hb}, \quad (10.38.)$$

kur: η – gaisa dinamiskā viskozitāte ir atkarīga no temperatūras, normālos apstākļos – $1,86 \cdot 10^{-5}$ (N·s/m²);

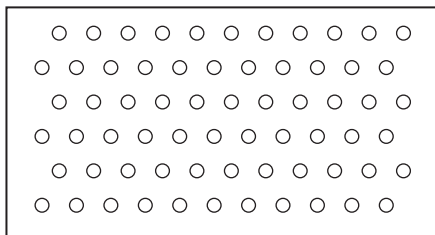
ρ – gāzes blīvums;



10.17. att. Akustiskās pretestības grafiskie simboli: a – akustiskā pretestība akustiskajā slēgumā; b – akustiskā pretestība akustiskās impedances analogijas slēgumā; c – akustiskā pretestība akustiskās admitances analogijas slēgumā.



10.18. att. Spraugas ģeometrija.



10.19. att. Perforēts siets.

X_A – akustiskā reaktance.

Savukārt, ja ir tieva caurulīte ar rādiusu a , garumu l un $a < 0,002\sqrt{f}$, tās akustiskā impedances ir:

$$Z_A(\omega) = R_A + jX_A = \frac{8\eta l x}{\pi a^4} + \frac{j\omega(4\rho l x)}{3\pi a^2} \quad (10.39.)$$

Ja izmanto pinumus, šķiedrainus materiālus, tad aprēķinus veikt ir komplicēti un tos aizstāj ar mērījumiem.

Ja ir izveidots perforēts siets, ar n caurumiem, kur caurums no cauruma atrodas lielākā attālumā nekā diametrs, tad kopējā impedances ir $\frac{1}{n}$ reizes mazāka.



ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅAM

1. Kā sauc zemāko frekvenci caurulēs?
2. Kas var ierosināt augstākas kārtas modas caurulēs?
3. Kādi viļņi rodas caurulēs?
4. Kādi ir robežnosacījumi abos galos atvērtai caurulei?
5. Kāda ir sakarība viļņa garumam un caurules garumam abos galos atvērtai caurulei?
6. Kas zināms par harmoniku klātesamību abos galos atvērtai caurulei?
7. Kādi ir robežnosacījumi vienā galā atvērtai caurulei?
8. Kāda ir sakarība viļņa garumam un caurules garumam vienā galā atvērtai caurulei?
9. Kas zināms par harmoniku klātesamību vienā galā atvērtai caurulei?
10. Kas raksturo akustisko impedanci Z_A ?
11. Ko attēlo un ar ko raksturojas akustiskā kapacitāte akustiskās impedances analogijas gadījumā?
12. Kurš no elektrisko shēmu elementiem atbilst akustiskajai masai akustiskās impedances analogijas gadījumā?
13. Kādus akustiskās pretestības piemērus varat nosaukt?

MIKROFONI



11

- 11.1. Spiediena mikrofons
- 11.2. Spiediena gradienta mikrofons
- 11.3. Kombinētais spiediena un spiediena gradienta mikrofons
- 11.4. Spiediena mikrofonu lietojums
- 11.5. Dinamiskie jeb elektromagnētiskie mikrofoni
- 11.6. Elektrostatiskie mikrofoni



Atmiņas un prāta treniņam

Mikrofoni ir elektroakustiskie pārveidotāji, kas akustisko enerģiju konvertē elektriskajā. Vispārinot var teikt, ka tie kalpo diviem mērķiem:

- pirmkārt, tos izmanto, lai mūziku vai cilvēka runu pārvērstu elektriskā signālā un to pārraidītu, vai arī veiktu signāla uztveršanu, apstrādi, ierakstu un tad reproducētu to;
- otrkārt, tie tiek izmantoti kā mērinstrumenti, lai akustisko signālu pārvērstu elektriskajā, tad veiktu tā apstrādi un vizualizāciju.

Dažos lietojumos, piemēram, telefonijā, liels izejas signāla līmenis, zema cena un liela mehāniskā izturība ir augstāk vērtēti parametri nekā pārveidošanas precizitāte. Citos lietojumos nelieli izmēri un augsta pārveidošanas precizitāte ir parametri, kurus vērtē augstāk par jutību un cenu.

Veicot akustiskos mērījumus, mēs esam ieinteresēti noteikt skaņas spiedienu vai gaisa daļiņu kustības ātrumu. Dažos mikrofonu lietojumos tiem ir nemainīgi jāveic sava pārveidotāja funkcija, neskatoties uz būtiskām apkārtējās temperatūras un barometriskā spiediena izmaiņām.

Lai nodrošinātu šos dažādos lietojumus, laika gaitā ir izveidoti dažādi mikrofonu tipi. Tos visus var iedalīt trīs klasēs, un katrā no tām ir dažādas modifikācijas:

- spiediena mikrofonu;
- spiediena gradienta mikrofonu;
- kombinētie mikrofonu.

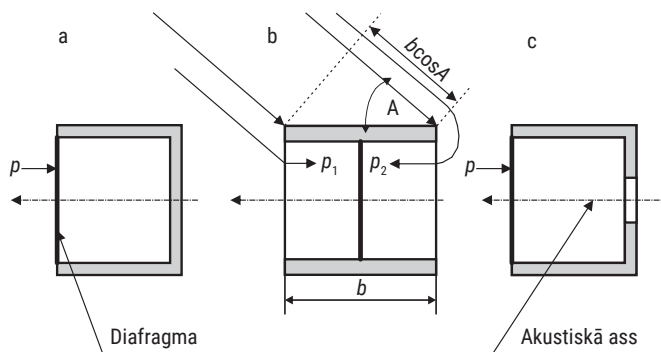
Mikrofonu dažādās uzbūves un atšķirīgie darbības principi redzami 11.1. attēlā.

Turpmāk aplūkosim šo trīs tipu atšķirīgos raksturlielumus. Šo mikrofonu uzbūves pamatā populārākie ir divu tipu pārveidotāji – elektromagnētiskie un elektrostatiskie

Šo mikrofonu vispārīgie parametri ir apkopoti 11.1. tabulā.

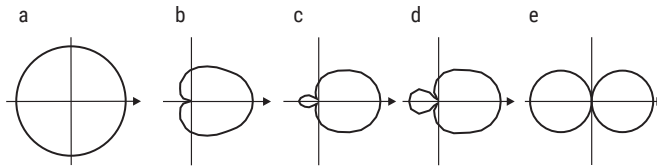
Būtiskākie mikrofonu tehniskie raksturojumi ir:

- frekvenču darba diapazons – frekvenču josla;



11.1. att. Mikrofonu tipi:
 a – spiediena mikrofons; b – spiediena gradienta mikrofons;
 c – kombinētais mikrofons.

Mikrofona tips	Spiediena	Spiediena-gradienta
Elektrostatiskie: <ul style="list-style-type: none"> • kondensatora tipa; • elektreta tipa; • pjezo tipa 	Pārvietojuma jutīgi, vadāma cietība, rezonanse augsto frekvenču diapazonā	Ātruma jutīgi, vadāma pretestība, rezonanse vidējo frekvenču diapazonā
Elektromagnētiskie: <ul style="list-style-type: none"> • ar kustīgu spolīti; • lentes tipa 	Ātruma jutīgi, vadāma pretestība, rezonanse vidējo frekvenču diapazonā	Paātrinājuma jutīgi, vadāma masa, rezonanse zemo frekvenču diapazonā



11.2. att. Vērsuma raksturlīknes:
a – aploce;
b – kardioīda; c – superkardioīda;
d – hiperkardioīda;
e – astotnieks.

- dinamiskais diapazons – skaņas līmeņu josla, kurā pārējie tehniskie parametri atrodas normas robežās;
- aksiālā jutība – attiecība starp atdoto spriegumu un sinusoidālas skaņas spiedienu brīvā laukā uz akustiskās ass;
- paštrokšņu līmenis – attiecība starp izejas efektīvo spriegumu, ja nav akustiskā lauka, un aksiālo jutību;
- vērsuma raksturojums – attiecība starp vispārīgo un aksiālo jutību;
- frontes-aizmugures koeficients – signāla līmeņu attiecība.

Mikrofoniem var būt atšķirīgas vērsuma raksturlīknes, dažādi aksiālās koncentrācijas un frontes-aizmugures koeficienti un indeksi (11.2.att.).

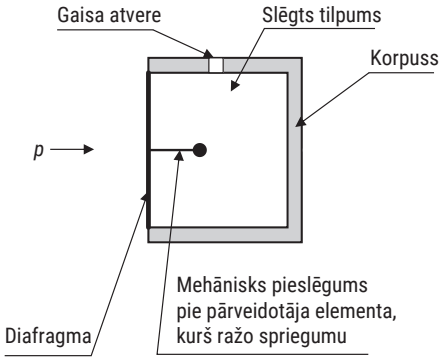
Ir mikrofoni, kuriem ar iebūvēta pārslēga palīdzību iespējams operatīvi mainīt kādu no šiem parametriem.

11.1. SPIEDIENA MIKROFONS

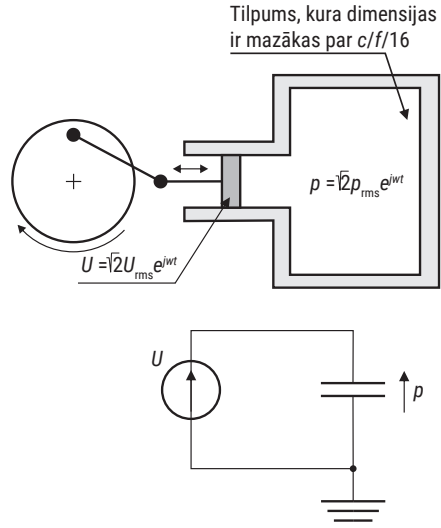
Spiediena mikrofons reaģē uz skaņas spiediena izmaiņām. Vienkāršotā veidā spiediena mikrofoni var attēlot kā slēgtu cilindrisku telpu, kuras vienā galā ir nostiprināta noslēdzošā diafragma.

Tilpuma sienā ir tieva atvere, caur kuru tiek izlīdzināts tilpuma un atmosfēras spiediens (11.3. att.). Taču skaņas viļņu izraisītās straujās spiediena izmaiņas liek diafragmai svārstīties.

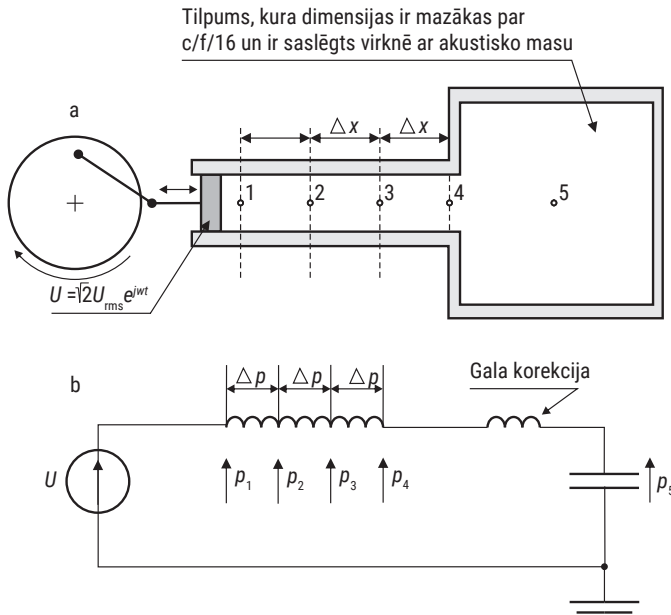
Ja spiediena mikrofoni ievieto nelielā tilpumā, kurā spiediens ir maināms (11.4. att.), tad izejas sprieguma līmenis būs nemainīgs, neatkarīgi no tā, kurā telpas punktā atradīsies mikrofons.



11.3. att. Spiediena mikrofons.



11.4. att. Spiediena kamera un tās elektriskais ekvivalents.



11.5. att. Spiediena gradienta veidošanās.

Savukārt, ja spiediena mikrofons tiek secīgi ievietots punktos 1,2,3,4, kā tas redzams 11.5. att. a, tas reaģēs atšķirīgi no punkta uz punktu. Tā cēlonis ir redzams 11.5. att. b. Spiediens no p_1 līdz p_4 krītas par lielumu Δp , ja izmaiņu solis Δx ir nemainīgs.

Ja spiediena mikrofons ir novietots plakanā skaņas vilnī ar nemainīgu intensitāti I (vatu plūsma caur vienības laukumu, kas atrodas plakanā viļņa priekšā), spēks, kurš iekustinās diafragmu, būs atkarīgs no frekvences, jo:

$$p_{\text{rms}} = \sqrt{I\rho c}, \quad (11.1.)$$

kur: I – plūsmas intensitāte (W/m^2);

ρ – gaisa blīvums normālos apstākļos ($1,18 \text{ kg/m}^3$);

c – skaņas ātrums (343 m/s).

11.2. SPIEDIENA GRADIENTA MIKROFONS

Spiediena gradienta mikrofons ir ierīce, kas reaģē uz spiediena starpību starp diviem tuvu novietotiem punktiem. Šiem mikrofoniem diafragmas abas puses ir vērstas pret skaņu viļņiem. Shematiska konstrukcija redzama 11.6. attēlā.

Ja spiediena gradienta mikrofons ir ievietots 11.5. att. redzamajā telpā, tā izejas spriegums būs nulle, jo tur nav spiediena spēka, kas iedarbotos uz diafragmu. Iemesls tam ir spiediena gradienta neesamība šajā telpā.

Cita situācija veidojas, ja spiediena gradienta mikrofonu secīgi ievieto pozīcijās 1 līdz 4 11.5. att. redzamajā konstrukcijā. Iegūtais izejas spriegums būs proporcionāls spiediena gradientam $\frac{\Delta p}{\Delta x}$, citiem vārdiem sakot, ja Δx lielums starp secīgajiem punktiem ir nemainīgs, izejas sprieguma lielumu noteiks atrašanās vieta.

Ja ļoti maza izmēra spiediena gradienta mikrofonu novieto plakanā skaņas vilnī, kas izplatās virzienā x , tad kompleksais spēks f_D , kurš iedarbojas uz diafragmu, ir:

$$f_D = -S \left(\frac{dp}{dx} \right) \cdot \Delta l \cos \theta, \quad (11.2.)$$

kur: p – skaņas spiediens;

S – diafragmas laukums.

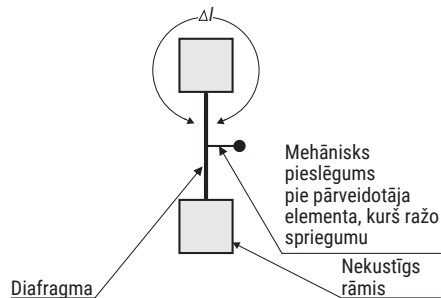
Plakana skaņas viļņa spiediena izteiksme, kad tas izplatās, ir:

$$k = \frac{\omega}{c}, \quad (11.3.)$$

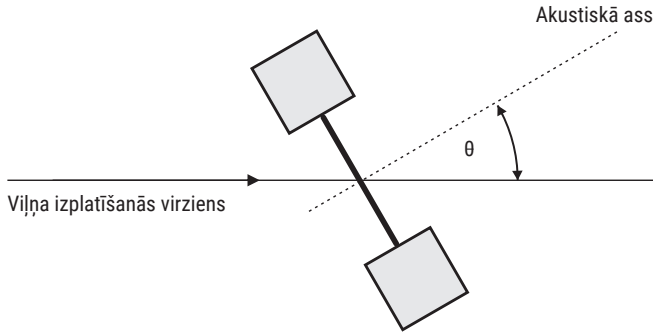
kur: $k = \omega/c$;

p_0 – spiediens pie $x = 0$.

Ja pieņemam, ka mikroфона ievietošana skaņas laukā neietekmē



11.6. att. Spiediena gradienta mikrofons.



11.7. att. Leņķis starp spiediena gradienta mikroфона akustisko asi un viļņa izplatīšanās virzienu.

spiediena gradientu, varam iegūt spiediena raksturlīknes vērtību jebkurā x punktā:

$$f_D = |p| \omega S \Delta l \cos \theta / c. \quad (11.4.)$$

Ir jāatceras, ka miera stāvoklī spiediena gradients ir proporcionāls $j\omega p_0$ reizinājumam ar daļiņu ātruma komponenti gradienta vērsuma virzienā. Spiediena spēks f_D savukārt ir proporcionāls daļiņu ātrumam pie dotās frekvences.

Ja 11.7. att. vērsuma leņķis $\theta = 90^\circ$, spēks, kas iedarbosies uz diafragmu būs līdzvērtīgs nullei, jo simetrijas nosacījumi parāda, ka spiediens abās diafragmas pusēs ir identisks.

No iepriekšējās izteiksmes ir redzams, ka efektīvais spēks, kas iedarbojas uz diafragmu, ir proporcionāls frekvencei un skaņas spiedienam.

Sfēriskajās koordinātēs mikrofonam, kura dimensijas ir mazas salīdzinājumā ar attālumu no centra r , izteiksme:

$$f_D = -S \left(\frac{dp}{dx} \right) \cdot \Delta l \cos \theta \quad (11.5.)$$

var pārveidot šādi:

$$f_D = -S \left(\frac{dp}{dr} \right) \cdot \Delta l \cos \theta. \quad (11.6.)$$

Zinot sfēriskā viļņa vienādojumu:

$$p(r) = A_0(e^{jkr})/r, \quad (11.7.)$$

kur: A_0 – spiediena amplitūda;

k – viļņa numurs,

un veicot ievietošanu, iegūstam:

$$f_D = \frac{A_0(1 + jkr)}{r^2} \cdot e^{-jkr} \cdot S \Delta l \cos \theta. \quad (11.8.)$$

Tas dod šādu izteiksmi:

$$|f_D|_{\text{rms}} = \frac{|p|_{\text{rms}} \cdot \omega S \Delta l \cos \theta}{c} \cdot \frac{\sqrt{1+k^2 r^2}}{kr}. \quad (11.9.)$$

Plakanā viļņī daļiņu ātruma u_{rms} un spiediena p_{rms} attiecību raksturo šāda izteiksme:

$$|u|_{\text{rms}} = \frac{|p|_{\text{rms}}}{\rho_0 c} \quad (11.10.)$$

un sfēriskā viļņī:

$$|u|_{\text{rms}} = \frac{|p|_{\text{rms}}}{\rho_0 c} \cdot \frac{\sqrt{1+k^2 r^2}}{kr}, \quad (11.11.)$$

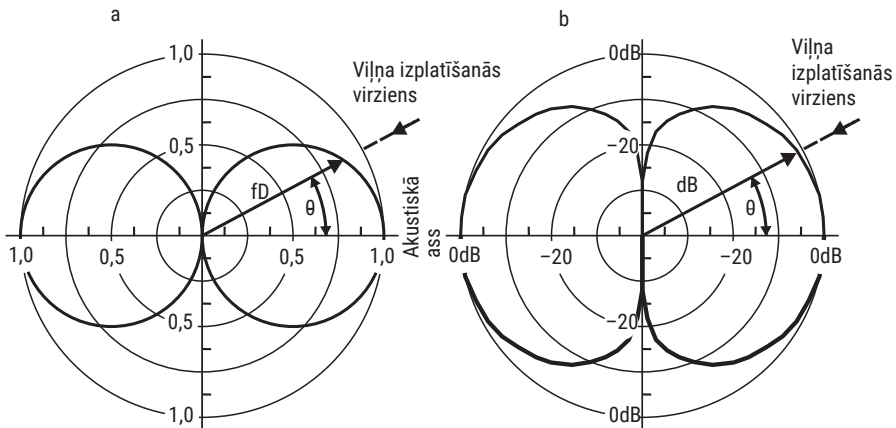
kur $|u|_{\text{rms}}$ ir daļiņu ātrums skaņas viļņa izplatīšanās virzienā, tad

$$|f_D|_{\text{rms}} = |u|_{\text{rms}} \omega \rho_0 S \Delta l \cos \theta. \quad (11.12.)$$

Citiem vārdiem sakot, spēks p_{rms} , kas iedarbojas uz spiediena gradienta mikroфона diafragmu, ir tieši proporcionāls daļiņu ātrumam u_{rms} viļņa izplatīšanās virzienā, frekvencei, gaisa blīvumam, diafragmas izmēriem un laukumam, un leņķim starp akustisko asi un viļņa izplatīšanās virzienu.

Šie nosacījumi ir spēkā jebkuram viļņu frontes tipam – plakanam, sfēriskam, cilindriskam vai jebkuram citam, ja vien mikroфона izmēri ir tik nelieli, ka tā klātbūtne neiespaido skaņas viļņi.

Pie jebkuras frekvences mikroфона raksturlielne ir proporcionāla leņķim θ , kas noteic virziena diagrammu (11.8. att. a).



11.8. att. Spiediena gradienta mikroфона virziena diagramma dažādās skalās.

Zīmējumos diagrammas veido astotnieka figūru. Frekvenču raksturlīkne spiediena gradienta (daļiņu ātruma) mikrofonam, kad tas ir novietots sfēriskā vilnī, ir funkcija no viļņa frontes izliekuma. No vienādojuma (11.13.) ir redzams, ka $k^2 r^2$ vērtības (kr ir līdzvērtīgs $\omega r/c$) ir lielas salīdzinājumā ar 1, ja daļiņu ātrums lineāri attiecas pret skaņas spiedienu. Lielākas kr vērtības nozīmē to, ka vai nu frekvence ir augsta, vai arī viļņa frontes izliekuma rādiuss ir liels:

$$|u|_{\text{rms}} = \frac{|p|_{\text{rms}}}{\rho_0 c} \cdot \frac{\sqrt{1+k^2 r^2}}{kr}. \quad (11.13.)$$

Turpretī, ja $k^2 r^2$ vērtības ir nelielas salīdzinājumā ar 1, tas nozīmē, ka frekvence ir zema vai viļņa frontes izliekuma rādiuss ir neliels, vai arī abi kopā. Daļiņu ātrums ir proporcionāls $\frac{|p|}{\omega r}$.

Tā rezultātā ir šādi novērojumi:

- ja cilvēks runā vai dzied pie spiediena gradienta mikroфона kustoties, tā ka attālums r mēdz būt mazs, balss šķietami izmainās, un parādās izteikti zemie toņi, jo samazinās augstie toņi;
- tas tāpēc, ka, pazeminoties frekvencei, mikroфона izejas līmenis pieaug.

Aploces Δl starpība ir atkarīga no diafragmas materiāla cietības. Ja mikrofonu var uzskatīt par reversu skaņas avotu, varam apskatīt ekvivalenta cieta vai elastīga skaņas avota starojuma impedanci, lai izprastu diafragmas spiediena un ātruma attiecību:

$$Z_s = \frac{f_D}{Su} = j\omega\rho_0 \Delta l \cos\theta. \quad (11.14.)$$

Ja pieņem, ka starojuma viļņa virziens sakrīt ar akustisko asi, tā ka $\theta = 0$, tad, ja ir ciets, apaļš virzulis ar rādiusu a bez demfera, starojuma impedanci var noteikt šādi:

$$Z_s(\text{pie } \bar{\lambda} \gg a) = \frac{f_D}{Su} = j\rho_0 c \cdot \frac{4ka}{3\pi}. \quad (11.15.)$$

Savietojot iepriekšējās izteiksmes, iegūstam:

$$\Delta l = \frac{4a}{3\pi}. \quad (11.16.)$$

Izmantojot atsperīgu disku brīvas telpas modelī, lai iegūtu izstarojuma impedanci perfekti elastīgai diafragmai, kur

$$Z_s(\text{pie } \bar{\lambda} \gg a) = \frac{j\rho_0 \cdot c\pi ka}{4}, \quad (11.17.)$$

iegūstam aploces izteiksmi:

$$\Delta l = \frac{\pi a}{4}. \quad (11.18.)$$

11.3. KOMBINĒTAIS SPIEDIENA UN SPIEDIENA GRADIENTA MIKROFONS

Šis saliktais mikrofons ir ierīce, kas reaģē gan uz skaņas viļņa spiedienu, gan uz spiediena gradientu.

Šādam mikrofonam ir izveidots tilpums gaisam, kam vienā pusē ir diafragma, bet tai pretējā pusē ir atvere, kurā ir ievietota akustiskā pretestība (11.9. att. a).

Mikrofona analogā shēma redzama 11.9. att. b.

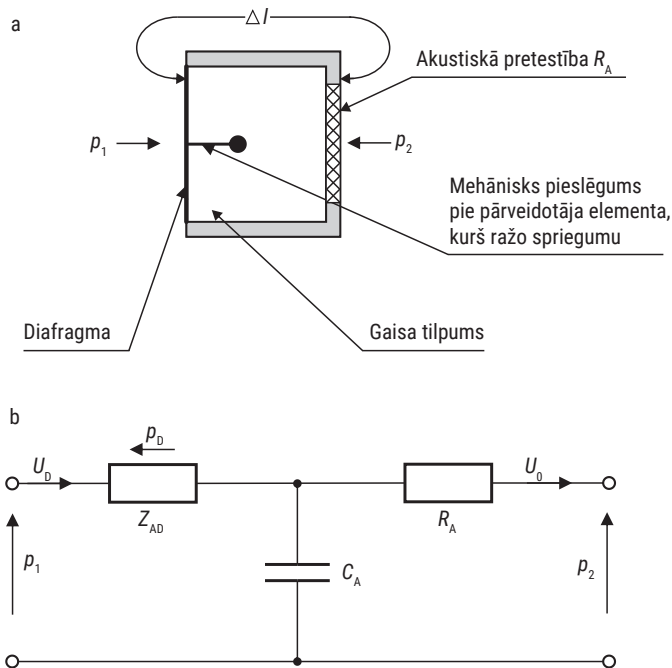
Ja pieņem, ka:

$$P_1 = p_0 \cdot e^{-jkx} \text{ un} \quad (11.19.)$$

$$p_2 = p_1 \left(1 - j \frac{\omega}{c} \cdot \Delta l \cos \theta \right), \quad (11.20.)$$

tad var teikt, ka U_D ir diafragmas tilpuma ātrums, U_0 ir caur akustisko pretestību plūstošā gaisa tilpuma ātrums, p_D ir neto spiediens, kas pārvieto diafragmu, un Z_{AD} ir diafragmas impedance.

Elektrostatiskā jeb lentes mikrofona gadījumā starojuma masai ir būtiska nozīme, un vienkāršības labad apzīmēsim to ar Z_D . Akustiskajai pretestībai arī



11.9. att. Kombinētais spiediena un spiediena gradienta mikrofons.

ir zināma masa, bet pieņemsim, ka tā ir maza salīdzinājumā ar akustisko pretestību. Tad saistībā ar 11.9.att. b var uzrakstīt šādus vienādojumus:

$$U_D \left(Z_{AD} + \frac{1}{j\omega C_A} \right) - \frac{U_0}{j\omega C_A} = p_1, \quad (11.21.)$$

$$-\frac{U_D}{j\omega C_A} + U_0 \left(R_A + \frac{1}{j\omega C_A} \right) = -p_2. \quad (11.22.)$$

Spiediena starpība abpus diafragmai ir:

$$p_D = \frac{p_1 Z_{AD} \left(R_A + \frac{\Delta l \cos \theta}{c} \cdot C_A \right)}{Z_{AD} R_A - j \cdot \frac{R_A + Z_{AD}}{\omega C_A}}. \quad (11.23.)$$

Rakstam vienādojumu:

$$\frac{\Delta l}{c \cdot C_A R_A} = B, \quad (11.24.)$$

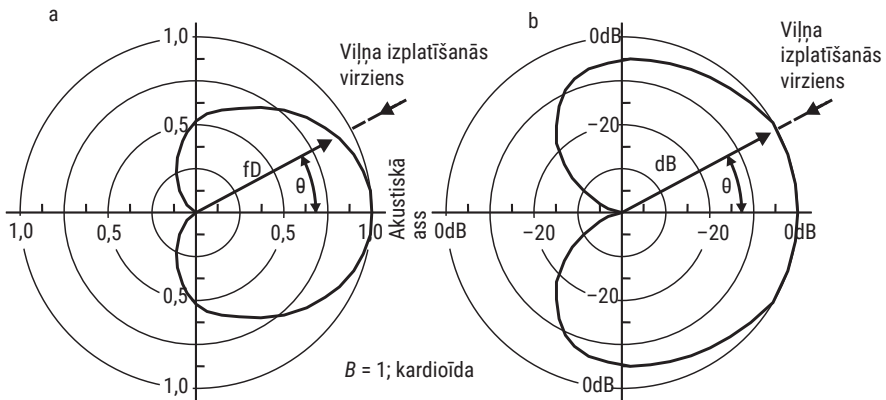
kur B – patvaļīgi izvēlēta bezdimensiju konstante, kas raksturo virziendarbības diagrammu.

Par cik:

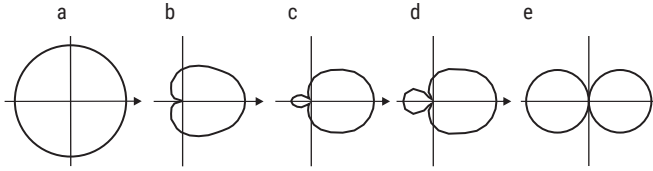
$$f_D = p_{DS}, \quad (11.25.)$$

kur: S – diafragmas aktīvais laukums;
 f_D – spēks, kas iedarbojas uz diafragmu, iegūstam:

$$|f_D| = p_1 |A| S (1 + B \cos \theta), \quad (11.26.)$$



11.10. att. Virziendarbības diagramma kombinētajam spiediena un spiediena gradienta mikrofonam.



11.11. att. Virziendarbības diagrammas:

A – aploce, $B = 0$; b – kardioīda, $B = 1$; c – superkardioīda, $B = 3$; d – hiperkardioīda, $B = 3$; e – astotnieks, $B = 5$.

kur A ir attiecība:

$$A = \frac{Z_{AD} \cdot R_A}{Z_{AD} \cdot R_A - j \frac{Z_{AD} + R_A}{\omega C_A}}. \quad (11.27)$$

Uz diafragmu vērstā spēka lielums atkarībā no leņķa θ , ja $B = 1$, ir redzams 11.10. att. a. Tas pats attēlā b , tikai ar dB skalu.

Citas virziendarbības diagrammas un to raksturojošās B vērtības (11.11. att.).

11.4. SPIEDIENA MIKROFONU LIETOJUMS

Spiediena mikrofoni ir visvairāk lietotais tips no visiem trīs iepriekš minētajiem (spiediena, spiediena gradienta, kombinētais). Tos izmanto akustiskajos mērījumos, lai uztvertu mūziku un runu studijās, dzirdes aparātos un daudz kur vēl.

Daudzi inženieri un arī mākslinieki uzskata, ka mūzika, kas ir reproducēta no augstas kvalitātes spiediena mikroфона, ir pārāka par reproducēto no lielākās daļas virziendarbības mikroфона, jo tiek saglabāta auditorijas vai studijas reverberācija, ir minimizēti nevēlamie viļņu formas kropļojumi un reproducētās skaņas kvalitāte nav strikti atkarīga vēl no daudziem citiem faktoriem, kā piemēram, cik tuvu pie mikroфона atrodas cilvēks vai instruments.

Skaņu pasaulē un mūzikas industrijā plaši lieto divu tipu spiediena mikrofonus: dinamiskos un kondensatoru mikrofonus. To darbības pamatā ir elektromagnētiskie un elektrostatiskie pārveidotāji.

Ir arī citu tipu mikrofoni: pjezoelektriskie, hidrofoni zemūdens sistēmās, kvēldiega mikrofoni aerodinamiskiem mērījumiem un Releja (*Rayleigh*) disks gāzu daļiņu absolūtā ātruma mērījumiem. Elektreta mikrofoni (elektrostatiskie ar uznestu lādiņu) un MEMS (*micromechanical*) tiek izmantoti mobilajos telefonos.

11.5. DINAMISKIE JEB ELEKTROMAGNĒTISKIE MIKROFONI

11.5.1. VISPĀRĪGIE RAKSTURLIELUMI

Aplūkosim un analizēsim komerciālos mikrofonus. Šie ir vidējās cenu grupas mikrofonu ar augstu jutību. Tos plaši lieto apraides sistēmās, vietās, kur nepieciešami gari kabeli vai kur ir straujas temperatūras un mitruma izmaiņas vai arī ir ekstremāli lielas to absolūtās vērtības.

Veiksmīgāko konstrukciju mikrofonu darbojas frekvenču diapazonā no **40 Hz** līdz pat **16000 Hz** un to frekvenču raksturlīknes nevienmērība ir **5 dB**, robežās. Skaņas spiediena jutība ir no **16 dBSPL** līdz pat **140 dBSPL**, respektīvi, var nomērīt **20 μ Pa** līmeni.

Raksturlīknes izmaiņas labākajos mikrofonos atkarībā no temperatūras, spiediena un mitruma ir no **3 dB** līdz **5 dB** robežās diapazonā līdz **1000 Hz**, ja vides parametru izmaiņu diapazoni ir: temperatūrai no **-15 °C** līdz **+40 °C**, spiedienam no **650 Hg** līdz **780 mm Hg** un relatīvajam mitrumam no **0** līdz **90 %**.

Elektrisko impedanci noteic spolītes vada parametri. Frekvenču diapazonā zem **1000 Hz** aktīvā pretestības komponente ir lielāka par reaktīvo. Lielākajai daļai dinamisko mikrofonu nominālā elektriskā impedance ir ap **300 Ω** .

Mehāniskā impedance nav augsta, un tas ļauj lietot slēgtos tilpumos, neuztraucoties par būtiskām skaņas spiediena izmaiņām tajos.

Lai pieslēgtu dinamisko mikrofonu pie pastiprinātāja, ir nepieciešams paaugstinošais transformators. Bieži vien tas ir iebūvēts mikroфона korpusā. Turpmākajā izklāstā aplūkosim mikroфона prototipu, kas ir tuvs firmas AKG mikroфона modelim **D230**.

Mikroфона būtiskākie raksturojošie parametri apkopoti 11.2. tabulā.

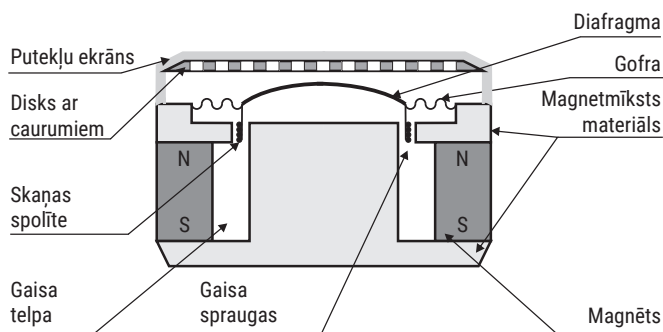


11.2. tabula

Tips	Dinamiskais mikrofons
Pārveidošanas princips	Spiediena pārveidotājs
Polārā diagramma	Aploce
Frekvenču diapazons	40 – 20 000 Hz
Jutība pie 1000 Hz	2,4 mV/Pa; –52 dB/Pa
Impedance	320 Ω
Rekomendētā slodzes impedance	>1000 Ω

11.5.2. ELEKTROMAGNĒTISKĀ MIKROFONA KONSTRUKCIJA

Elektromagnētiskais mikrofons ar kustīgu spolīti sastāv no diafragmas, kurai ir piestiprināta vadu spolīte un tā atrodas magnētiskajā laukā (11.12. att.). Diafragmas abās pusēs ir akustiskie slēgumi, kas ļauj paplašināt frekvenču diapazonu.



11.12. att. Dinamiskā mikrofona konstrukcija.

11.5.3. ELEKTRĪBAS-MEHĀNIKAS-AKUSTIKAS ATTIECĪBAS

Skaņas viļņi iziet caur pretputekļu ekrānu un nonāk pie diska ar skaņas caurumiem, kurš atrodas pirms diafragmas. Šie diska caurumi veido nelielu akustisko masu un nelielu akustisko pretestību, kaut gan lielākoties akustisko pretestību veido pretputekļu ekrāns.

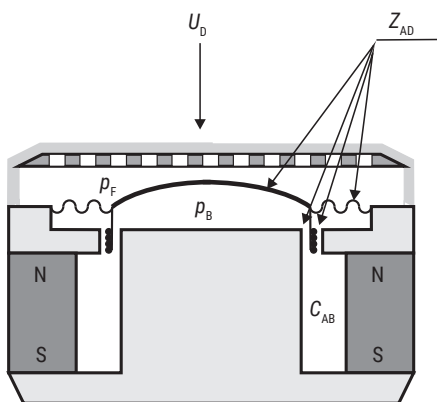
Skaņas caurumi ir ar nelielu diametru, un to izstarošanas impedance, kas darbojas kā skaļrunis, ir reaktīva visā frekvenču diapazonā.

Priekšējam nelielajam tilpumam starp caurumiem un diafragmu piemīt neliela akustiskā elastība.

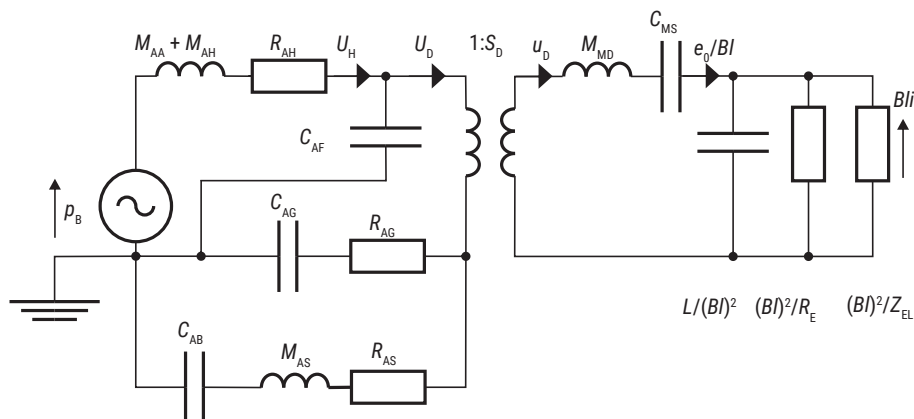
Mikrofona elektroakustiskais analogs ir redzams 11.13. attēlā.

U_D ir diafragmas tilpuma ātrums, un tas ir vienāds ar efektīvā lineārā ātruma u_D reizinājumu ar efektīvo diafragmas laukumu S_D .

Impedance Z_{AD} ietver sevī masu, elastību un visus kustīgo mehānisko daļu zudumus. p_F un p_B ir attiecīgi spiediens pirms un aiz diafragmas.



11.13. att. Elektroakustiskais analogs.



11.14. att. Dinamiskais mikrofons impedances analogijā: p_B – spiediens aiz diafragmas; $M_{AA} + M_{AH}$ – preptutekļu ekrāna un diska ar caurumiem izstarojuma akustiskā masa diafragmas virzienā; R_{AH} – preptutekļu ekrāna un diska ar caurumiem akustiskā pretestība; U_H – gaisa tilpuma ātrums caur diska caurumiem; U_D – diafragmas tilpuma ātrums; C_{AF} – elastība gaisa telpai pirms diafragmas, C_{AG} – elastība gaisa telpai aiz diafragmas; R_{AG} – akustiskā pretestība aiz diafragmas; C_{AB} – akustiskā kapacitāte telpai aiz diafragmas; M_{AS} – preptutekļu ekrāna akustiskā masa; R_{AS} – preptutekļu ekrāna akustiskā pretestība; u_D – diafragmas efektīvais lineārais ātrums; M_{MD} – diafragmas masa; C_{MS} – gofras elastība; $e_0 = Bl u_D$ – spriegums, ko ģenerē nenoslogota mikroфона spolīte; B – magnētiskā plūsma; l – elektriskā vadītāja garums, kuru šķērso magnētiskās plūsmas līnijas; R_E – spolītes elektriskā pretestība; Z_{EL} – mikroфона elektriskās slodzes impedance; I – strāva; S_D – diafragmas efektīvais laukums.

C_{AB} ir gaisa telpa aiz diafragmas un tā raksturojas kā akustiskā kapacitāte.

Dinamiskā mikroфона ar kustīgu spolīti kompleksais elektromehānikas-akustikas slēgums impedances analogijā ir redzams 11.14. attēlā. Salāgošanas transformators shēmā nav attēlots.

11.5.4. ELEKTROMAGNĒTISKĀ MIKROFONA UZBŪVES SHĒMA

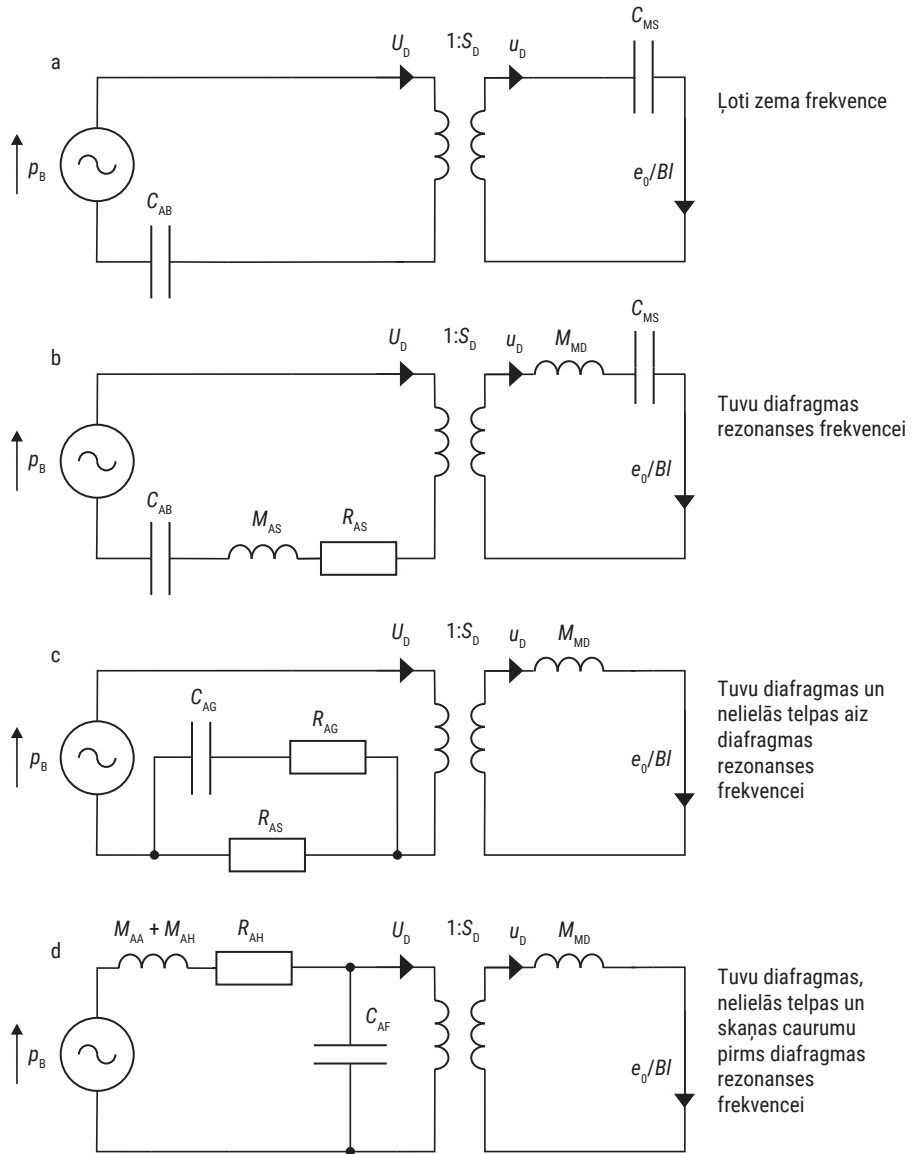
Dinamiskā mikroфона uzbūves shēmu (11.14. att.) vieglāk izprast, aplūkojot 11.15. att. shēmas, kuras ir 11.14. att. funkcionālie atvasinājumi.

Pieņemsim, ka Z_{EL} tiecas uz $1/0$ (*tukšgaitas režīms*). Z_{EL} ir mikroфона slodzes ienestā impedance.

Tas nozīmē, ka izejas ķēde nav noslēgta un izejas potenciāls ir e_0 . 11.14. att. išslēgtas shēmas ātrums ir e_0/Bl .

Aplūkosim nenoslogota mikroфона analogijas slēgumu shēmas dažādos frekvenču apgabalos (11.16. att.).

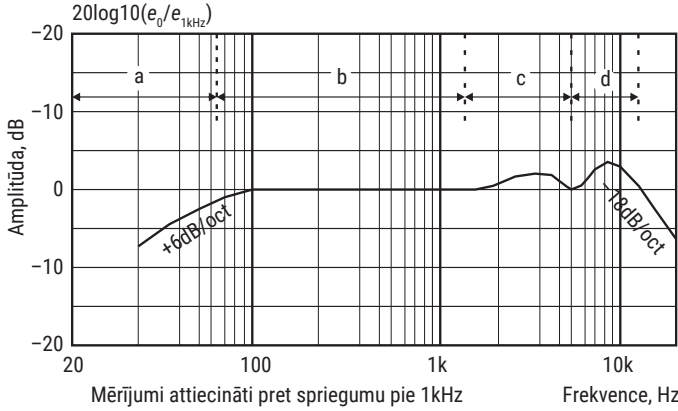
Pie ļoti zemām frekvencēm 11.14. att. shēma ir reducējama uz 11.17. attēlā redzamo.



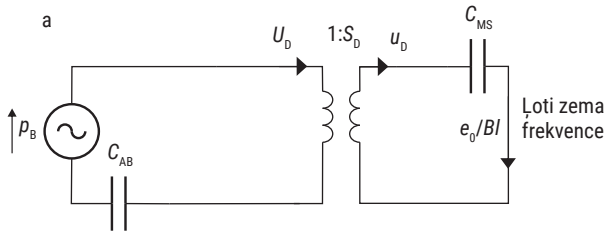
11.15. att. Slēguma ekvivalentās shēmas analogijas dažādos frekvenču apgabalos.

Šis apgabals ir redzams 11.16. att. apgabalā a. Te visas pretestības un masas reaktances ir nelielas salīdzinājumā ar reaktanci C_{AB} un $C_{MS}S^2D$.

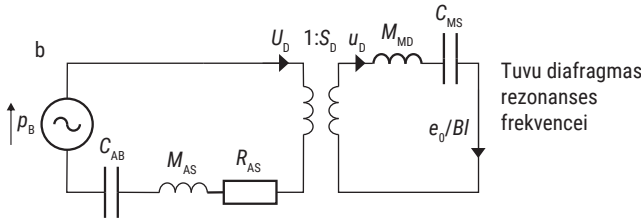
Tātad e_0 ir neliels. Frekvenču liknes pieaugums šajā apgabalā ir **6 dB** uz oktāvu.



11.16. att.
Nenoslogota
dinamiskā
mikrofona frekvenču
raksturliktne.



11.17. att.
Ekvivalentā shēma
ļoti zemu frekvenču
apgabalā.



11.18. att.
Ekvivalentā shēma
tuvu diafragmas
rezonanses
frekvencei.

Frekvencei pieaugot (11.18. att.), kļūst jūtama mikroфона citu konstrukcijas elementu klātbūtne.

Šis apgabals ir attēlots 11.16. att. apgabalā b. Svarīgs konstrukcijas elements ir pretputekļu ekrāns R_{AS} . Šai pretestībai ir jābūt gana lielai, lai šajā apgabalā nodrošinātu pēc iespējas plakanāku frekvenču raksturliktni.

Vājinājums ir tik liels, ka šim apgabalam tiek definētas galējās raksturliktnes pārliekuma frekvences ω_L un ω_U un arī rezonanses frekvence ω_0 :

$$\omega_L = \frac{C_{AB} + S_D^2 \cdot C_{MS}}{R_{AS} \cdot C_{AB} \cdot S_D^2 \cdot C_{MS}}; \quad (11.28.)$$

$$\omega_U = \frac{R_{AS}}{M_{AS} + \frac{M_{MD}}{S_D^2}} \quad (11.29.)$$

un

$$\omega_b = \sqrt{(\omega_L \cdot \omega_U)}. \quad (11.30.)$$

ω_L apzīmē zemāko frekvenci, kur **-3 dB** līmenī salīdzinājumā ar plakano posmu beidzas **6 dB/oktāva** pieaugums. Šī frekvence ir ap **55 Hz**.

Augstākā frekvence ir plakanā posma apgabala **b** augšējais gals. Pie rezonanses frekvences ω_b masas un elastības elementi nav nozīmīgi. Svarīgs ir tikai akustiskās pretestības elements R_{AS} .

Pie šīs frekvences joslas vidusdaļas jutība ir aprēķināma šādi:

$$e_0 = \frac{Blp_B}{S_D \cdot R_{AS}}. \quad (11.31.)$$

Šinī gadījumā tā ir:

$$2,4 \frac{\text{mV}}{\text{Pa}} \text{ vai } -52 \frac{\text{dB}}{\text{Pa}}. \quad (11.32.)$$

Tālākajā apgabalā **c** ir jūtama diafragmas masas M_{MD} un gaisa elastības C_{AG} aiz diafragmas ietekme (11.19. att.).

Rezonanses frekvence apgabala **c** vidū ir aprēķināma šādi:

$$\omega_C = \frac{S_D}{\sqrt{M_{MD} \cdot C_{AG}}} \quad (11.33.)$$

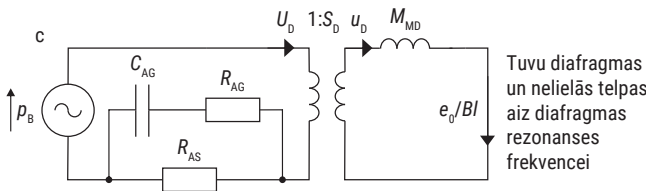
Tā kā gaisa sprauga starp spolīti un korpusu ir neliela, caurplūstošais gaiss uz rezonansi iedarbojas kā vājinātājs R_{AG} . Protams, arī šajā diapazonā ir vēlams, lai likne būtu pēc iespējas plakanāka.

Ja R_{AS} vērtība ir liela, tad tā vājina C_{AG} un M_{AS} antirezonanses īpašības, tā rezultātā liknē veidojas iekritums.

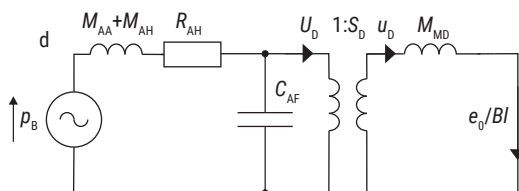
Trešā rezonanse ir novērojama, ja ir iesaistīti akustiskie elementi pirms diafragmas (11.20. att. un 11.16. att. apgabals **d**).

Rezonanses frekvenci ω_D apgabala **d** vidū aprēķina šādi:

$$\omega_D = \frac{1}{\sqrt{(M_{AA} + M_{AH}) \cdot C_{AF}}}. \quad (11.34.)$$



11.19. att. Ekvivalentā shēma tuvu diafragmas un nelielās telpas aiz diafragmas rezonanses frekvencei



11.20. att.
Ekvivalentā shēma tuvu diafragmas, nelielās telpas un skaņas caurumu pirms diafragmas, rezonanses frekvencei.

Tā kā te ir trīs reaktīvi elementi M_{AA} , M_{AH} , C_{AF} un M_{MD} , liknei parādās kritums **-18 dB/oktāva**. Te it kā mikrofons būtu slogots ar kapacitatīvu kabeli, kas rezonē ar spolītes induktivitāti vienā un tajā pašā frekvencē.

Salāgošanas paaugstinošajam transformatoram arī ir ierobežota caurlaides josla, taču, ja ir veikts rūpīgs transformatora projektēšanas darbs, mikroфона izveidē nav nepieciešami kompromisa risinājumi.

Savu lomtu te spēlē transformatora serde un tinumu sekciju izveide, lai mazinātu frekvenču raksturliknes galu kropļojumus. Transformatora induktivitāte zemajā galā un kapacitāte augšējā galā ir tie parametri, kuriem, veidojot konstrukciju, jāatrod optimālais lielums.

Šie dažādie rezonanses nosacījumi galarezultātā izveido pēc būtības plakanu raksturlikni frekvenču diapazonā no **50 Hz līdz 20 000 Hz**. Izņēmums ir difrakcijas efekti ārpus mikroфона.

Difrakcija iespaido frekvenču raksturlikni dažādos veidos atkarībā no tā, kāds ir viļņu izplatīšanās virziens attiecībā pret mikrofonu un mikroфона novietojumu. Parasti raksturlikne tiek ietekmēta apgabalos **c** un **d**, ja skaņu viļņi atduras mikroфона priekšpusē perpendikulāri salīdzinājumā ar situāciju, kad tie veido kādu leņķi.

Viens no ārējā aizsargekrāna uzdevumiem ir mazināt šo ietekmi.

11.6. ELEKTROSTATISKIE MIKROFONI

11.6.1. VISPĀRĪGIE RAKSTURLIELUMI

Vēsturiskā informācija vēsta, ka elektrostatisks jeb kondensatora mikroфона izgudrošana datējama ar 1928. gadu. Tā autors bija vācu uzņēmējs Neimānis (*Neumann*).

Pirmais komerciālais produkts tika marķēts kā *CMC3*. Mūsdienās kondensatora mikroфoni tiek plaši lietoti skaņas spiediena mērījumos, skaņas ierakstu studijās augstvērtīgiem mūzikas ierakstiem, kā arī apskaņošanas industrijā, it īpaši koru un simfoniskās mūzikas orķestru apskaņošanā.

Sākotnēji kondensatora mikrofonu gabarīti bija ievērojami. Mūsdienās tie ir kļuvuši mazāki, tomēr, neskatoties uz to, jutība frekvenču diapazonā zem **1000 Hz** nepazeminās.

Skaņas spiediena mērījumus var veikt diapazonā no **10 dB** līdz pat **185 dB**, attiecinot pret **0,0002 μBar**. Frekvenču raksturliktne ir ļoti plakana – zem **3 dB**. Mikrofonos raksturo zems trokšņu līmenis. Ir stabila darbība plašā apkārtējās vides temperatūru diapazonā. Temperatūras koeficients labākajiem modeļiem ir zem **0,025 dB/°C**.

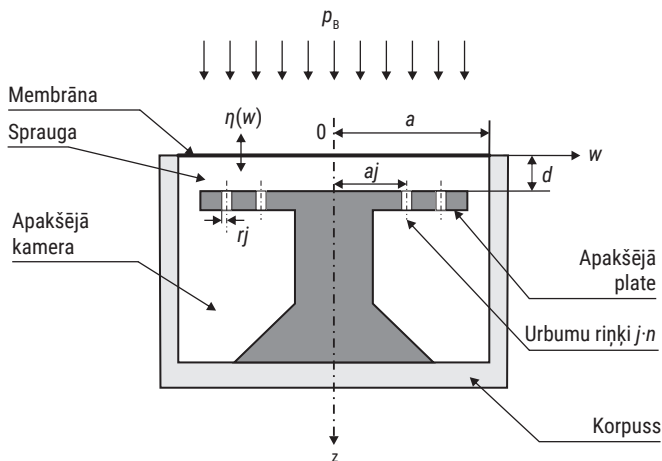
Elektriskā impedances ir analogiska elektriskā kondensatora impedances. Ja ierīce ilgstoši darbojas paaugstināta mitruma apstākļos, pieaug trokšņu līmenis, jo pazeminās izolācijas līmenis starp klājumiem. Kvalitāti var atjaunot, veicot žāvēšanu.

11.6.2. UZBŪVE UN PIESLĒGUMS

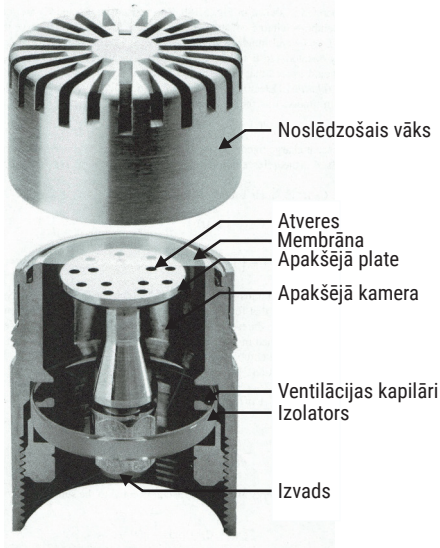
Mikrofona nosaukuma saistība ar kondensatoru ir saskatāma tā konstrukcijā. Mikrofonam ir divi paralēli savstarpēji izolēti klājumi, kur vienu no tiem iesvārsta skaņas viļņi, tādējādi mainot kondensatora kapacitāti.

Vienkāršots *Brüel & Kjær 4190* mikroфона modeļa uzbūves rasējums redzams 11.21. att. un tā šķērsriezums 11.22. att. Augstas precizitātes mērmikrofonos membrānu un apakšējo plati veido no niķeļa, nerūsošā tērauda vai titāna. Viskvalitatīvākajos modeļos izmanto titānu. Diafragma ir ļoti plāna, tikai dažus **μm**, un tās uzspriegojums ir virs **2000 N/m**. Attālums starp membrānu un apakšējo plati ir niecīgs.

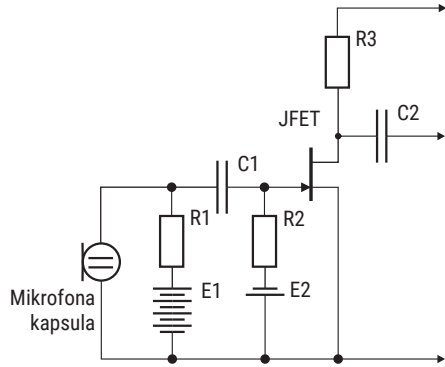
Ir daudz vēsturisku liecību par Latvijas izgudrotāju un inženieru varējumu elektronikas industrijā. Ir ziņas par to, kā kondensatora mikrofonus Latvijas radiofona studijas vajadzībām izgatavoja jau pirmās brīvvalsts laikā.



11.21. att.
Kondensatora mikroфона kapsulas uzbūve.

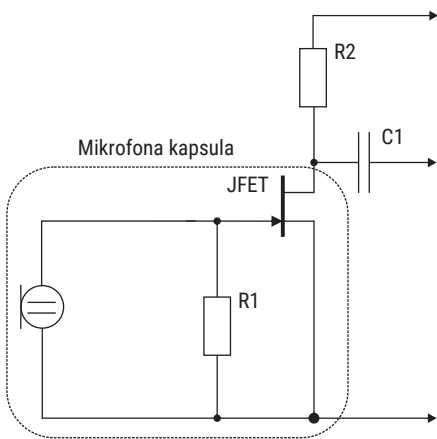


11.22. att. Kondensatora mikroфона kapsulas šķērsgriezums.



11.23. att. Kondensatora mikroфона pieslēgums. E1 – polarizācijas sprieguma avots.

Mikrofonu izgatavotāja stāstītāis: “*Liels grūtības sagādāja plāno membrānu izgatavošana. Tika atrasta oriģināla metode. Uz izolētas, augsti pulētas virsmas (superfinišs) galvaniski veidojām metāla plēvīti – foliju. Variējot ar galvanizācijas strāvu, ieguvām dažāda biezuma folijas.*”



11.24. att. Elektreta kondensatora mikroфона pieslēgums.

Apakšējā platē izveidotie urbumi *rj* (11.21. att.) ietekmē akustisko rezistanci, tādējādi slāpējot membrānu pie rezonanses frekvences.

Kondensatora mikroфона klājumi ir jāpolarizē, to veic ar līdzspriegumu. Pirmsākumos šis polarizācijas spriegums bija ļoti augsts, virs **100 VDC**.

Kondensatora mikroфона kapsulas izejas strāva ir niecīga, tāpēc ir nepieciešams priekšpastiprinātājs.

Vēsturiski pirmsākumos tas tika būvēts, izmantojot elektronu vakuuma lampu, kurai savukārt arī bija nepieciešami vairāki barošanas spriegumi. Lampu un pastiprinātāju iebūvēja mikroфона korpusā.

Mikrofons ar barošanas bloku un pastiprinošo iekārtu tika savienots caur daudzdzīslu kabeli.

Ap 1960. gadu parādotes pusvadītāju ierīcēm, barošanās spriegumi samazinājās, jau minētais Neimanis piedāvāja tā saukto fantombarošanu (*phantom*) **P48**, proti, **48 VDC**, kas kondensatora mikrofoniem kļuva par pasaules standartu.

Tehnoloģijas attīstījās, tika izgudrots elektreta mikrofons, kam klājumu polarizācija tiek veikta rūpnīcā – izgatavošanas procesā.

Arī salāgošanas buferelements, lauktranzistors JFET, (11.24. att.) ir iebūvēts kapsulā. Tagad savienojošajam kabelim ir nepieciešamas tikai trīs dzīslas.

11.6.3. ELEKTROMEHĀNISKĀS SAKARĪBAS

Tātad, ja elektriski kondensatora mikrofona var aplūkot kā kondensatoru, tad to raksturo laikā mainīga kapacitāte un klājumu summāro lādiņu $Q(t)$ var aprakstīt ar šādu izteiksmi:

$$Q(t) = q_0 + q(t) = C_E(t) \cdot (E + e(t)), \quad (11.35.)$$

kur: q_0 – pastāvīgs lādiņš, C; ($1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ F} \cdot 1 \text{ V}$);

$q(t)$ – mainīgs lādiņš, C;

$C_E(t)$ – kapacitāte, F;

E – pastāvīgs polarizācijas spriegums, V;

$e(t)$ – mainīgs sprieguma lielums, V.

Savukārt kapacitātes izmaiņas nosakāmas šādi:

$$C_E(t) \approx C_{EO} \left(1 + \frac{\eta(t)}{d} \right), \quad (11.36.)$$

kur: C_{EO} – kapacitāte miera stāvoklī, F;

$\eta(t)$ – membrānas vidējais pārvietojums, m;

d – kondensatora klājumu attālums miera stāvoklī, m.

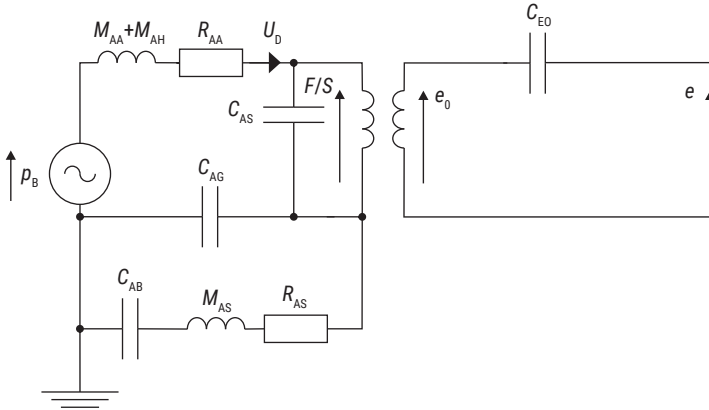
Dažādos frekvenču apgabalos noteicoša loma raksturlīknes veidošanā ir dažādām mikroфона detaļām un elementiem. Zemo frekvenču apgabalā a iegūtais spriegums e_0 (11.25. att.) nav atkarīgs no frekvences.

Membrānas C_{AS} akustiskā elastība ir apgriezti proporcionāla membrānas uzspriegojumam T . Savukārt apakšējās kameras (11.25. att.) akustiskā elastība C_{AB} ir tieši proporcionāla kameras tilpumam V un apgriezti proporcionāla atmosfēras spiedienam P_0 .

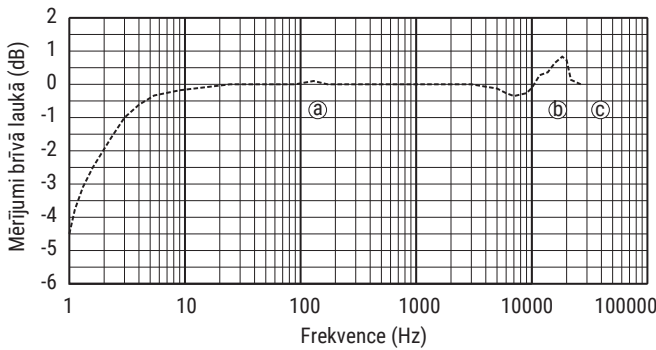
Mērmikrafonos membrānas uzspriegojums ir gana liels un $C_{AB} \gg C_{AS}$, tādējādi mazinot mikroфона jutību pret atmosfēras spiediena izmaiņām.

Frekvenču raksturlīknes veidošanā apgabalā pie pirmā svarīgākā rezonanses punkta iesaistās jaunas mikroфона detaļas un elementi.

Rezonanses gadījumā gaisa tilpuma ātrumu caur apakšējās kameras akustisko elastību C_{AB} nosaka tikai membrānas akustiskās pretestības R_{AS}



11.25. att. Kondensatora mikroфона pilnā elektroakustiskā shēma impedances analogijā: p_B – ārējais spiediens uz nobremzētu membrānu; R_{AA} – gaisa akustiskā pretestība; R_{AS} – membrānas akustiskā pretestība; C_{AS} – membrānas akustiskā elastība; C_{AG} – starpkļājumu spraugas akustiskā elastība; C_{AB} – apakšējās kameras akustiskā elastība; E – polarizācijas spriegums; C_{E0} – miera stāvokļa kapacitāte; M_{AA} – gaisa akustiskā masa; M_{AD} – membrānas akustiskā masa; U_D – tilpuma ātrums; S – membrānas efektīvais laukums; F – spēks; d – starpkļājumu attālums; e_0 – vaļējas ķēdes spriegums; e – izejas spriegums.



11.26. att. Kondensatora mikroфона B&K 4190 frekvenču raksturlīkne brīvā laukā.

raksturlīkne. Šī pretestība ir izveidota gana liela, un pīķis pie rezonances ir mazāks par **2 dB** (26 %) virs plakanās daļas zemo frekvenču apgalbā. Rezonanse redzama līknes punktā b (11.26. att.).

Virzoties tālāk pa frekvenču asi, tilpuma ātrumu nosaka masas reaktance. Šajā apgalbā raksturlīknes kritums ir **12 dB/oct**. Rezonances punktus var novērot arī tālākā frekvenču apgalbā.

Konstruējot kondensatora mikrofonu, ir vēlams minimizēt starpkļājumu attālumu d . Tas dod iespēju palielināt mikroфона jutību un arī uzlabot attiecību signāls/troksnis.

Nav labuma bez ļaunuma. Uzlabojot iepriekšējos rādītājus, tiek samazināta membrānas svārstību amplitūda un līdz ar to tiek pazemināta maksimālā spiediena robeža.

Variējot elektriskā lauka $\frac{E}{d}$ lielumu, starpklājumu attālumu un uzspriegojumu, ir iespējams izveidot mikrofonu, ar kuru var mērīt reaktīvā dzinēja radīto skaņas spiedienu.



ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅAM

1. Kādu funkciju un kā pilda mikrofonu?
2. Vai varat nosaukt mikrofonu iedalījumu pēc darbības principa?
3. Vai varat nosaukt mikrofonus pēc uzbūves principa?
4. Kādi ir mikrofonu būtiskākie raksturlielumi?
5. Kāds ir spiediena mikroфона darbības princips?
6. Kāds ir spiediena gradienta mikroфона darbības princips?
7. Kāds ir kombinētā mikroфона darbības princips?
8. Kā ir uzbūvēts elektrodinamiskais mikroфons?
9. Kā ir uzbūvēti elektrostatiskie mikroфoni?
10. Kāds ir elektrostatisko mikrofonu iedalījums?
11. Kas ir fantombarošana?
12. Ar ko izceļas mērmikroфoni?

ELEKTRODINAMISKIE SKAĻRUŅI



12

- 12.1. Skajruņa konstrukcija
- 12.2. Magnētiskā sprauga un skaņas spolīte
- 12.3. Difuzors
- 12.4. Tīles-smola (thiele-small) parametri
- 12.5. Difuzora kustība pie dažādām frekvencēm
- 12.6. Skajruņa parametru mērīšana
- 12.7. Skajruņa jutība
- 12.8. Skajruņa elektriskā ieejas impedances
- 12.9. Skajruņa frekvenču raksturlīkne un skaņējuma kvalitāte
- 12.10. Akustiskais panelis un korpuss
- 12.11. Bezgalīga izmēra panelis
- 12.12. Slēgts korpuss



Atmiņas un prāta treniņam

Elektrodinamiskais skaļrunis vai skaļrunis ar kustīgu spolīti ir elektromagnētiskais pārveidotājs elektriskā signāla transformācijai akustiskajā. Principā elektrodinamiskais skaļrunis ir lineārs elektromotors, kurš gaisa masu virza turpatpakaļ un rada skaņas viļņus. Te arī ir skrejviļņi – krītošie un atstarotie.

Praktisko skaņas pastiprinātāju ēras pirmsākumos vienīgā pastiprināšanas ierīce bija elektronu lampa (*saukta arī radio lampa*) un izejas jaudas nodrošināšanas izmaksas bija augstas. Un līdz ar to elektrodinamisko skaļruņu darbības lietderība bija viens no svarīgākajiem faktoriem.

Attīstoties shemotehnikai un tehnoloģijām, pastiprinātāju izmaksas uz vienu vatu samazinājās un parādījās stabila tendence veidot nelielus skaļruņus un tos slēgt pie jaudīgiem pastiprinātājiem, kuri kompensēja skaļruņa mazā difuzora izstarojuma lietderības samazināšanos.

Elektronu vakuuma lampas aizstāja silīcija tranzistori. Tika izstrādāti jauni shemotehniskie risinājumi un parādījās dažādu risinājumu digitālie audio pastiprinātāji. Populārs kļuva impulsu platuma modulācijas jeb D klases pastiprinātājs.

Mobilajās ierīcēs, kuras tiek barotas no akumulatoru baterijām, lietderības problēma joprojām ir aktuāla. Būtisks sasniegums mobilo ierīču izstrādē bija retzemju metālu izmantošana. Neodīma magnēti ļāva būtiski samazināt ierīču gabarītus.

Ir divu tipu skaļruņi: tādi, kam svārstīgā virsma (difuzors) izstaro skaņu viļņus tieši telpā, un tādi, kuros ir starpposms starp diafragmu un telpu – rupors. Tiešā starojuma skaļruņus izmanto mājās, automobiļos, mobilajās ierīcēs un ne pārāk lielās sabiedriskās apskaņošanas sistēmās.

Savukārt ruporskaļruņus izmanto augstas kvalitātes hi-fi apskaņošanas sistēmās teātros, koncertzālēs, atklātās vietās ārpus telpām, jo tie ļauj kontrolēt virziendarbību.

Tiešā starojuma skaļruņu priekšrocības ir:

- nelieli gabarīti;
- zema cena;
- dzirdes diapazonā apmierinoša frekvenču-amplitūdas raksturlīkne.

Savukārt būtiskākie trūkumi ir:

- zema lietderība;
- šaura vērsma diagramma augsto frekvenču apgabalā.

Lietojot šī tipa skaļruņus mājās, automobilī vai mobilajās ierīcēs, kur ir nepieciešama neliela jauda, priekšrocības kompensē trūkumus. Turpretī teātros, koncertzālēs, atklātā vietā, kur nepieciešama liela jauda un konstrukciju gabarītmēri nav ierobežoti, izmanto ruportipa skaļruņus vai veido ruporsistēmas.

Ir arī citu konstrukciju skaļruņi: pjezo, elektrostatiskie, taču izvērstāk aplūkosim elektrodinamiskos, jo tie ir visplašāk lietotie.

Visi iepriekšējās nodaļās aplūkoto mikrofonos lietotie pārveidošanas principi ir pilnībā attiecināmi arī uz skaļruņiem.

12.1. SKAĻRUŅA KONSTRUKCIJA

Aplūkosim 12.1. att. redzamo skaļruņa uzbūvi šķērsgrīzumā.

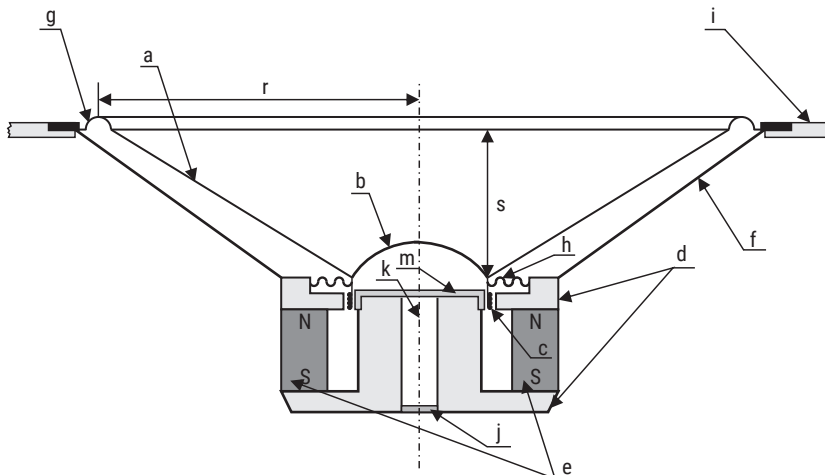
Šādas konstrukcijas skaļrunis ir paredzēts apskaņošanai zemo un vidējo audiofrekvenču apgabalā. Tas sastāv no ievērojama skaita elementiem. Mūsu interese ir pievērsta trīs elementu grupējumiem:

- magnēta stiprinājums un skaņas spolīte – pārveidošanas mehānisms;
- skaņas spolīte, difuzors, ārmas gofra un centrējošā ripa – mehāniskā sistēma;
- difuzors, pretputekļu aizsargs, ventilācijas kanāls, akustiskā pretestība-putekļu filtrs, panelis un rāmis – akustiskā sistēma.

Difuzors *a* ir nošķelts konuss, kas izgatavots no viegla un gana cieta materiāla. Cietība ir svarīgs parametrs, jo difuzors var locīties. Centrālajā daļā ir putekļu aizsargs *b*, kas pasargā no metālisku mikrodaļu iekļūšanas magnētiskajā gaisa spraugā kā arī novērš aizmugures daļas radīto viļņu noplūdi ārtelpā.

Ja skaļrunis tiek iebūvēts basu skandā, tad rezonanses gadījumā šāda noplūde var nopietni pazemināt labumu *Q*. Konusa augšdaļā ir nostiprināts skaņas spolītes karkass *c* ar tinumu. Spolīte *c* atrodas magnētiskās plūsmas spraugā, kurā magnēti *e* caur mīksta magnētiska materiāla konstrukcijas *d* elementiem veido šo plūsmu.

Rāmis *f* satur visus skaļruņa konstrukcijas elementus un caur to notiek stiprināšana pie skandas vai paneļa *i*. Difuzora augšmalā ir ārmas gofra *g*,



12.1. att. Tiešā starojuma elektrodinamiskais skaļrunis, nostiprināts bezgalīga izmēra panelī:

a – difuzors; *b* – putekļu aizsargs; *c* – skaņas spolīte; *d* – mīksts magnētisks materiāls; *e* – magnēts; *f* – rāmis; *g* – difuzora ārmas gofra; *h* – centrējošās ripas gofra; *i* – panelis; *j* – akustiskā pretestība; *k* – ventilācijas kanāls; *m* – išslēguma skava; *r* – rādiuss; *s* – attālums.

caur kuru difuzors stiprinās pie rāmja. Savukārt difuzora un skaņu spolītes savienojuma vietā ir centrējošā ripa h arī ar gofras veidojumu. Šīs divas gofras nodrošina to, ka difuzors var pārvietoties tikai aksiāli.

Vēsturiski dinamisko skaļruņu pirmie magnēti bija elektromagnēti. Tā bija spole, kas tika barota ar DC . Attīstoties elektronikas un akustikas industrijai, 1930. gadā tika izgudrots magnēts alniko (*Aluminium-Nickel-Cobalt*). Turpmākā attīstība 1970. gadā deva ferītu magnētus. Tas gan notika ekonomisku apsvērumu dēļ. Mūsdienu audio industrijā plaši tiek lietoti neodīmija magnēti.

Skaļruņa uzbūves attīstības gaitā no 1924. gada, kad Raisa-Kelloga (*Rice-Kellogg*) patents tika apstiprināts, nav notikušas būtiskas izmaiņas tā konstrukcijā.

Skaņas viļņi, kurus rada difuzora aizmugure, telpā nokļūst caur rāmja f logiem. Savukārt putekļu aizsarga aizmugures puses radītie skaņu viļņi noplūst uz ārtelpu var tikai caur magnētisko spraugu un centrējošo ripu h , kas ir izgatavota no impregnēta elastīga tekstila.

Dažiem specializēta lietojuma skaļruņiem ir ventilācijas kanāls k , kura galu noslēdz putekļu aizsargs j , kas vienlaikus ir arī akustiskā pretestība.

Pieslēdzot skaņu spolīti maņsprieguma avotam, mainīgais magnētiskais lauks tajā mijiedarbojas ar pastāvīgo magnētisko plūsmu magnētiskajā spraugā, radītā spēka ietekmē spolīte pārvietojas un kustina arī difuzoru, pie kura tā ir piestiprināta. Kustīgais difuzors atgrūž gaisa molekulas no savas virsmas, radot skaņas vilni. Parasti zemo frekvenču apgabalā difuzors ir gana stings un kustās kā viens vesels.

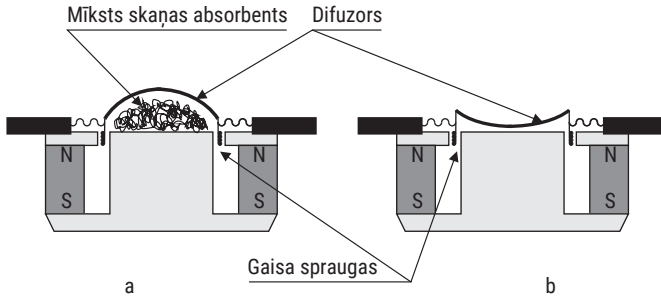
Augstāku frekvenču apgabalā vibrācijas no centra viļņu veidā izplatās uz difuzora ārmaļu. Šie viļņi un difuzora rezonanses frekvence veido skaļruņa frekvenču amplitūdas raksturliknes nelīdzenumu augsto frekvenču apgabalā un atšķirīgi ietekmē skaņas viļņu izstārošanos dažādos virzienos.

Difuzorus var izgatavot ar dažādu formu un no dažādiem materiāliem. Metāla difuzoriem ir neliels iekšējais vājinājums, un rezonanses gadījumā tiem ir augsts labums Q . Augsto frekvenču apgabalā metāla difuzoru cietības un elastības rādītāji ir labāki nekā papīra vai polimēru difuzoriem.

Projektējot un izgatavojot skaļruni, ir svarīgi izvēlēties atbilstošu materiālu ārmales gofrai, kā arī optimāli piestiprināt skaņu spolītes karkasu un centrējošo ripu, lai minimizētu rezonanses parādības.

Papīra un polimēru difuzoriem ir liels iekšējais vājinājums, kas veicina augsto frekvenču spiediena viļņu absorbciju, tiem izplatoties no skaņu spolītes pa difuzoru. Šinī gadījumā novērojama interesanta parādība: pieaugot frekvencei, difuzora izstārošanas efektīvais laukums samazinās, tas ir izdevīgi, lai saglabātu plaši izkļiedētu skaņas lauku. Tā rezultātā viļņu izstārošanu nodrošina pretputekļu ekrāns, un stacionārs difuzors veic rupora funkcijas.

Pieņemam, ka 12.1. att. skaļrunis ir iemontēts plakanā bezgalīgā panelī i . Praksē tas nav iespējams, bet tā ir ideāla konfigurācija, kas ļauj vienkāršot skaļruņa analīzi. Šis pieņēmums nodrošina to, ka neveidojas akustiskais



12.2. att.
Augstfrekvences
skaļruņi.

īsslēgums, t.i., difuzora priekšpuse un aizmugure ir izolētas. Analīzes nolūkos zemo frekvenču apgabalā difuzoru var uzskatīt par plakanu virzuli ar rādiusu r , kurš ģenerē vienāda ātruma viļņus pa visu tā virsmu. Tā ir pieņemama aproksimācija frekvencēm, kurām attālums b ir mazāks par $1/10$ no viļņa garuma. Virzulis bezgalīga izmēra panelī ir tikai skaņas avots, kas dod vienmērīgu tālo skaņas lauku ar konstantu paātrinājumu uz akustiskās ass.

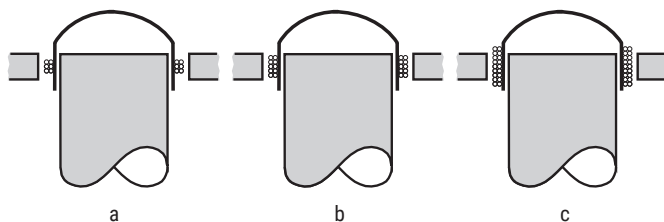
12.2. att. redzams augsto toņu skaļrunis ar kupolveida difuzoru.

Šis difuzors var būt gan izliekts, gan ieliekts. Difuzora forma nosaka viļņu starojuma diagrammu polārajās koordinātēs. Ieliektajam difuzoram ir izteiktāka virziendarbība, proti, šī raksturlīkne ir šaurāka par izliekto. Ja ir rupora konstrukcijas skaļrunis, tad šis augsto toņu skaļrunis (*tweeter*) parasti ir ar ieliektu difuzoru.

12.2. MAGNĒTISKĀ SPRAUGA UN SKAŅAS SPOLĪTE

Skaļruņa magnētu uzturētais magnētiskais lauks, mijiedarbojoties ar skaņas spolīti, pārvieto to attiecībā pret magnētu. AC strāva, plūstot pa spolītes tinumu, rada dinamisku magnētisko lauku. Statisku magnētisko lauku nodrošina skaļruņa rāmī nostiprināti pastāvīgie magnēti. Parasti rāmja un magnētu masa ir nesalīdzināmi lielāka par spolītes masu, tāpēc tās ietekme nav vērā ņemama.

Skaņas spolīte atrodas skaļruņa konstrukcijas vidū un tai ir cilindriska forma. Spolītes karkass ir no cita materiāla, tas notur tinumus un ir piestiprināts pie difuzora. Šī mezgla izveides kvalitāte ir svarīga, jo spolīte un tās izvadu stiprinājums nedrīkst izraisīt nevēlamas difuzora deformācijas. Mērķis ir izveidot spolīti, kurai būtu niecīga masa un zema elektriskā pretestība. Spolītes karkasam jānodrošina nemainīga izmēru ģeometrija. Tam ir jānovada siltums no spolītes tinuma, jāstrādā kā radiatoram. Lielas jaudas skaļruņiem spolītes karkasu veido no metāla, lielas jaudas zemfrekvences skaļruņiem – no alumīnija vai vara.



12.3. att. Skaņas spolītes tinuma platums.

Spolītes karkasam ir izveidota perforācija, kas kustības laikā izraisa gaisa turbulenci un tādējādi paaugstina dzesēšanas efektivitāti. Liela problēma ir skaņas spolītes pārkaršana, tas padara vadu lakojumumu un stiprinājuma līmi mīkstu, kas izraisa tinumu slīdēšanu. Sekas var būt skaņas kvalitātes zudums (jauda, frekvenču diapazons), bet nepatīkamākais ir spolītes noslīdēšana un pārdeģšana.

Spolītes tinuma platumam ir jābūt atbilstoša izmēra salīdzinājumā ar magnētiskā lauka plūsmu gaisa spraugā. Daži izpildījuma varianti redzami 12.3. attēlā.

Principiāli ir iespējams nedaudz kompensēt nelinearitāti magnētiskajā laukā un difuzora elastību, izveidojot īpašu skaņu spolītes konstrukciju. Daudzos gadījumos tinuma platums ir tikai nedaudz mazāks par magnētiskās spraugas platumu (12.3. att. b).

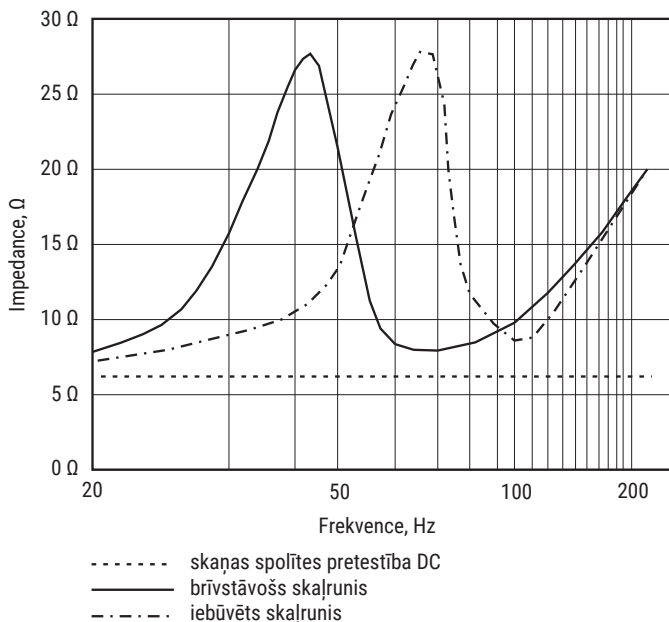
Zemo toņu skaļruņiem (*woofers*) – *baseniekiem* bieži vien tinums ir ievērojami platāks par magnētiskās plūsmas spraugu (12.3.att. c), jo tie nav tik jutīgi pret spolītes masu un tiem ir jāiekustina lielas gaisa masas.

Augsto toņu skaļrunim spolītes pārvietojums nav liels. Nelielais spolītes augstums uzlabo kustīgās sistēmas attiecību spēks/masa un līdz ar to palielina lietderību (12.3.att. a).

Skaņas spolītes elektrisko pretestību noteic uztītā vada materiāla īpašības un vijumu skaits. Šo tinumu veido no speciāli formēta vara, alumīnija vai reizēm no sudraba vada. Augstas kvalitātes skaļruņiem vada šķērssgriezuma laukums ir sešstūris vai taisnstūris. Tas ļauj samazināt tinuma ģeometriju. Spolītes tinuma pretestība ir jāizveido tāda, lai jaudas zudumi pievadkabelī būtu mazi salīdzinājumā ar zudumiem spolītē, tas ļauj lietot augstomīgu pieslēgumu.

Tajā pašā laikā liela skaņas spolītes pretestība ir zaudējumi, no pastiprinātāju izstrādātāju redzespunkta, jo īpaši automobiļu industrijā. Elektriskā DC pretestība parasti skaņu spolītēm ir **2-16 Ω** diapazonā. Samontētai skaņas spolītei piemīt elektriskā impedances, kuru veido spolītes pretestība un induktivitāte, magnēts un mehāniskā sistēma. 12.4. att. redzams spolītes impedances modulis kā frekvences funkcija.

Attēlā redzams, ka iebūvētam skaļrunim rezonanses frekvences pīķis pārvietojas pa frekvenču skalu uz augšu. Tas saistīts ar gaisa masas elastības parametru. Induktivitāte izraisa impedances pieaugumu augstākās frekvencēs. Zemāku frekvenču apgabalā mehāniskās sistēmas kustīgums skaņu spolītē



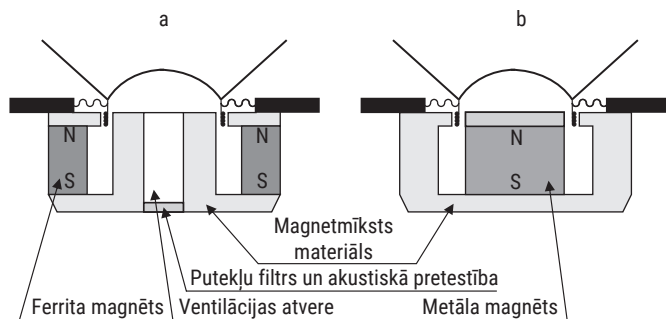
12.4. att. Skaļruņa spolītes impedances modulis.

izraisa lielu atpakaļgaitas elektromotorisko spēku, kas transformējas vienā vai vairākos impedances pīķos. Šīs pīķu amplitūdas un frekvences izmanto, konstruējot un regulējot skandas.

Magnētu sistēma ietekmē skaņas spolītes inductivitāti un zudumus. Dažkārt uz centrālā magnēta pola izvieto vara izslēguma gredzenu, lai samazinātu un linearizētu inductivitāti, samazinot virpuļstrāvas, kuras polos rada spolītes magnētiskais lauks. Statisku magnētisko lauku gaisa spraugā nodrošina magnēts vai DC strāvas barota spole, un šo lauku pārvada magnētmiķsts materiāls.

Magnētus skaļruņī var izvietot dažādi (12.5. att.).

12.5. att. a redzams ferīta magnēts zemo toņu skaļruņī, bet attēlā b redzams neodīma magnēts augsto toņu skaļruņī.



12.5. att. Elektrokinamisko skaļruņu magnētu sistēmas izpildījuma varianti.

Vēlamo magnētisko lauku nosaka skaļruņa mehāniskā sistēma, elektriskā sistēma un skandas korpus. Visi šie faktori ietekmē skaļruņa jutību, rezonanses frekvenci, vājinājumu rezonanses gadījumā un skaļruņa atbilstību dotā tilpuma un konstrukcijas skandas korpusam.

Augstas kvalitātes skaļruņos magnētiskajai ķēdei ir jānodrošina minimāla magnētiskā lauka plūsmas intensitātes gaisa spraugā atkāpe no noteiktās, tos ražojot lielos apjomos.

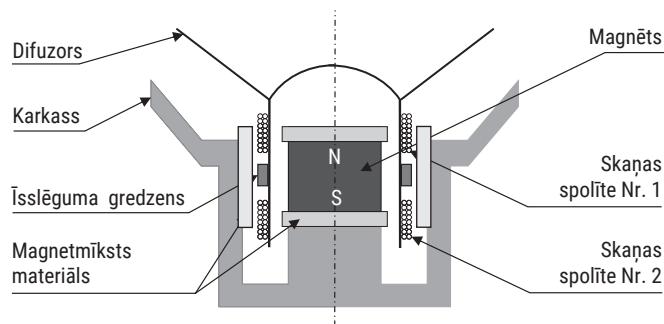
Lai gaisa spraugā iegūtu pietiekami augstu magnētiskās plūsmas blīvumu, tai ir jābūt diezgan šaurai. Parasti spolīti dzesē magnēta masa un šaurajai gaisa spraugai ir jābūt spējīgai dzesēt spolīti no abām pusēm. Tad siltums tiek novadīts apkārtējā gaisā caur magnēta sistēmu un rāmi. Ja gaisa sprauga ir pārlietu šaura, spolīte saskarsies ar sienām, būs berze, troksnis, un beigās spolīte izies no ierindas.

Šī problēma ir pazīstama mobilo telefonu mikroskaļruņiem. Ja gaisa sprauga ir plata, tad ir vājš magnētiskais lauks, zema skaļruņa jutība un slikta dzesēšana.

Ja spraugā ievada magnētisku dzesēšanas šķidrumu, kas sastāv no viskozas ferīta suspensijas, var paplašināt spraugu, saglabāt plūsmas blīvumu un veicināt labāku dzesēšanu. Šī ir kopēja pieeja vidējo un augsto toņu skaļruņiem. Taču šī metode nav lietojama zemo toņu skaļruņiem, jo šķidrums ir viskozs un var izplūst ārā no spraugas. Magnētiskā sistēma nav simetriska aksiālā virzienā, jo magnētiskais lauks spraugā nav identisks laukam sistēmas iekšpusē un ārpusē.

Augsto toņu skaļruņu spolītes šaurā tinuma nelinearitātei ir maza nozīme. Zemo un vidējo toņu skaļruņiem magnētiskā lauka asimetrijai ir liela nozīme. Nedaudz magnētiskās plūsmas nelinearitāti gaisa spraugā var novērst, izveidojot divas gaisa spraugas un divas skaņas spolītes, kuras darbina vienu un to pašu difuzoru. Šādi iespējams mazināt nelineāros kropļojumus, kas saistīti ar magnētiskā lauka asimetriju. Šādus skaļruņus sauc par divspoļu skaļruņiem.

Divspoļu skaļruņiem ir mazāka masa, un tie izklidē magnētisko lauku. Kāds izpildījuma variants redzams 12.6. attēlā.



12.6. att. Divspoļu skaļruņi.

12.3. DIFUZORS

Kustīgo daļu mezglu skaļrunī veido difuzors, skaņas spolīte, centrējošā ripa un ārmalas gofra. Difuzora svārstību un izstarošanas īpašības noteic šādi faktori:

- difuzora materiāls (biezums, blīvums, Junga modulis);
- difuzora profils (plakans, taisns konuss, hiperbolisks konuss, konuss ar rievām utt.);
- difuzora stiprinājums un homogenitāte (viendabīgums);
- skaņas spolīte (masa un stiprinājums);
- ārējā gofra un centrējošā plāksne (masa, cietība, zudumi un ģeometrija);
- gaisa slodze abpus difuzoram.

Dažiem skaļruņiem difuzors darbojas kā ciets virzulis plašā frekvenču diapazonā, un visa tā virsma kustas sinfāzi. Šiem skaļruņiem parādās izteikta virziendarbība, ja skaņas viļņa garums ir salīdzināms vai lielāks par difuzora rādiusu r (sk. 12.1. att.).

Tā kā plakanai plāksnei ir grūti saglabāt cietību un nelielu masu, difuzoriem ir koniska vai sfēriska forma, lai nodrošinātu nepieciešamo stingrību. Diafragmas sistēmas īpašības ietekmē atskaņojamo skaņu, tāpēc daudzi komerciālie skaļruņi ir ļoti līdzīgi, izņemot difuzoru.

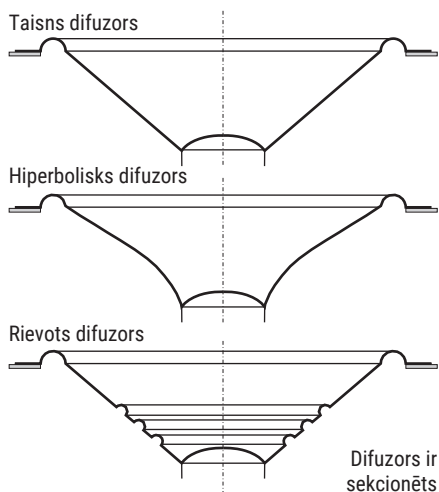
Tiek izgatavoti arī augstas kvalitātes skaļruņi, kuros difuzors svārstās kā stingra, tomēr elastīga plāksne. Ja ir iespējams vadīt difuzora locīšanās modu un tā slāpējumu, tad var iegūt diezgan vienmērīgu frekvenču raksturlīkni un

virziendarbību, it īpaši, ja tas ir saistībā ar telpas reverberācijas lauku. Šādiem difuzoriem parasti ir plakana apaļa vai taisnstūrveida forma.

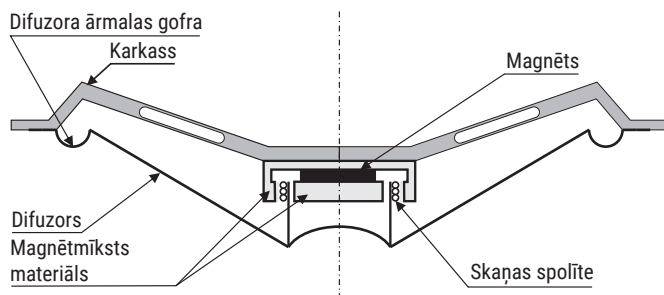
Koniskas formas difuzori, izgatavoti no slāpējoša elastīga materiāla, joprojām ir populāri augstas kvalitātes skaļruņos. Ar šādiem difuzoriem pirmām kārtām var iegūt raksturlīkni bez rezonanses punktiem, un konusa efektīvā virsma sarūk, pieaugot frekvencei

Dažādas difuzoru formas redzamas 12.7. attēlā.

Rievotais difuzors adaptējas pie skaņas signāla viļņa garuma. Šāds risinājums vienkāršo lietojumu daudzskaļruņu sistēmās, kur katrs skaļrunis ir paredzēts noteiktam



12.7. att. Dažādas difuzoru formas.



12.8. att.
Automobiļa durvju skaļrunis ar invertētu spolīti un magnēta sistēmu.

frekvenču diapazonam. Lai virziendarbība būtu nemainīga, ir svarīgi, lai skaļrunis vienlīdz efektīvi strādātu arī frekvenču joslu pārejas punktos.

Ja izmanto eliptisku konusu, tad ir iespējams palielināt tā virsmu dažos lietojumos, kuros regulārais konuss esošo virsmu neizmanto optimāli. Ar eliptiskas formas difuzoru ir iespējams iegūt atšķirīgas virziendarbības raksturliknes horizontālajā un vertikālajā plaknē. Konusa dziļums un pussfēra izraisa aizturi un būtisku interferenci starp difuzora iekšpusi, centru un tā ārpusē daļām. Tā rezultātā pie zemām frekvencēm rodas frekvenču raksturliknes iekritumi. Koniskam difuzoram virziendarbības raksturlikne ir līdzīga virzulim, taču ne tik izteikta.

Ja ir dziļš konusveida formas difuzors un ir vēlams precīzs kustības un virziena modelis, ir izdevīgi izmantot galīgus elementus vai galīgu elementu modelēšanas metodes, lai izstrādātu difuzoru un tā virziendarbības modeli.

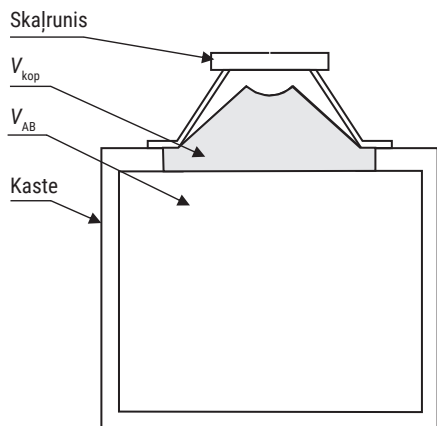
Galīgu elementu modelēšanu var izmantot, lai modelētu iespējamo difuzora izliekšanos vai kādu citu nelineāru parādību. Ja difuzors ir vājš lielas kustību amplitūdas gadījumā, to var deformēt skandas gaisa masas slodze. Tas rada ievērojamus nelineāros kropļojumus.

Maksimālais pieļaujamais skaļruņa biezums noteic ieliektā vai izliektā difuzora izvēli. Izliektam difuzoram ir mazāk izteikta virziendarbība salīdzinājumā ar ieliektu. Ja skaļruņa biezumu ierobežo telpa, tad var izmantot ieliektu difuzoru, piemēram, automobiļu akustiskajās sistēmās (12.8. att.).

12.4. TĪLES-SMOLA (Thiele-Small) PARAMETRI

Šie parametri ir skaļruņi raksturojošie lielumi. To skaits ir liels, vairāki desmiti, taču pilno skaļruņa analogijas modeli zemo frekvenču apgalbā var raksturot ar šādiem sešiem parametriem:

- R_E – skaļruņa spolītes pretestība līdzstrāvai, Ω ;
- Q_{ES} – skaļruņa elektriskais labums;
- Q_{MS} – skaļruņa mehāniskais labums;
- Q_{TS} – skaļruņa kopējais labums;



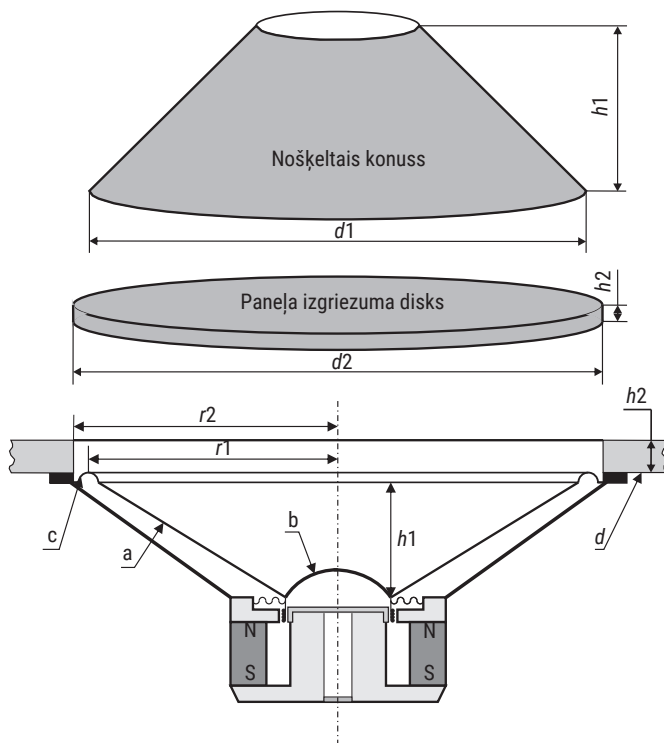
12.9. att. Skaļruņa sloģošana ar zināmu akustisko tilpumu V_{AB} .

- f_s – rezonanses frekvence brīvā laukā;
- V_{AS} – ekvivalents tilpums m^3 .

Parametrs R_E vistiešākajā veidā saistīts ar pastiprinātāja izejas sprieguma lielumu, tātad nepieciešamo elektrisko jaudu, lai iegūtu vēlamo akustisko jaudu. Kā zinām $P = U^2/R$.

Šie un arī citi parametri ir atrodami skaļruņu ražotāju dokumentācijā. Tīles-Smola parametrus ņem vērā, projektējot akustiskos agregātus.

Skaļruņa ekvivalents saspiešanas tilpums V_{AS} visciešākajā veidā ir saistīts ar skandas tilpumu V_{AB} . Ja V_{AB}



12.10. att. Skaļruņa ekvivalentā saspiešanas tilpuma noteikšana: a – difuzors; b – putekļu aizsargs; c – difuzora ārmas gofra; d – panelis; r – rādiuss; h1 – nošķeltā konusa augstums; h2 – paneļa biezums.

ir mazāks par V_{AS} , ir lielāka akustiskā impedance, ir lielāka gaisa masas pretestība difuzora kustībai un otrādi. V_{AB} ietekmē skaļruņa impedances raksturlīkni, respektīvi, rezonanses frekvenci. Aplūkosim, kā aprēķina V_{AS} , ja tas nav dots.

Šajā metodē izvēlas slēgtu kasti-skandu ar zināmu tilpumu (12.9. att.). **12"** (300 mm) skaļrunim kastes tilpums varētu būt ap **30 L**. Skaļruni stiprina no ārpuses ar darba virsmu vērstu kastes iekšāpusē. Nosaka rezonanses frekvenci f_b .

Aprēķinu rezultāti tiek iegūti ar zināmu tuvinājumu, jo ir apgrūtināti veikt precīzus mērījumus. Tas saistīts ar to, ka virsmas nav taisnas. Lai mūs mierina tas, ka vidējais klausītājs dzird līmeņu izmaiņas tikai tad, ja tās pārsniedz **3 dB**.

Aprēķinam tilpumu diskam un konusam (12.10. att.):

$$V_{\text{dis}} = \pi r_2^2 h_2; \quad (12.1.)$$

$$V_{\text{kon}} = \frac{\pi r_1^2 h_1}{3}; \quad (12.2.)$$

$$V_{\text{kop}} = V_{\text{dis}} + V_{\text{kon}}. \quad (12.3.)$$

Skaļruņa ekvivalento tilpumu ļauj izvēlēties šāda sakarība:

$$V_{AS} = V_{\text{sum}} \left(\left(\frac{f_b}{f_s} \right)^2 - 1 \right), \quad (12.4.)$$

$$\text{kur } V_{\text{sum}} = V_{AB} + V_{\text{kop}}; \quad (12.5.)$$

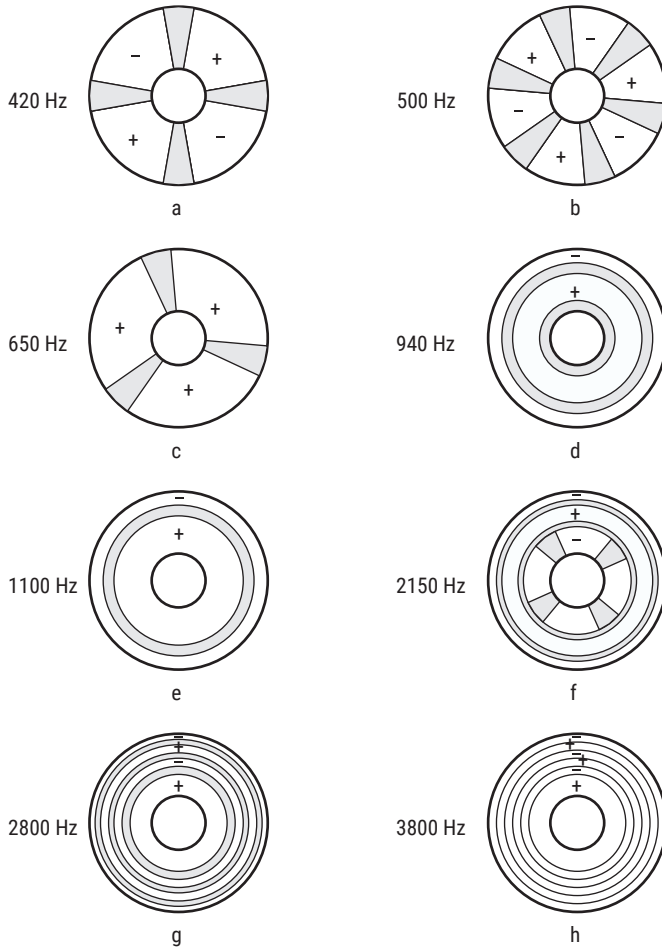
f_b – rezonanses frekvence skandā;

f_s – rezonanses frekvence brīvā laukā.

12.5. DIFUZORA KUSTĪBA PIE DAŽĀDĀM FREKVENCĒM

Frekvenču apgabalā virs **300 Hz** skaļruņa difuzors nesvārstās kā viens vesels. Dažādi difuzora apgabali uzvedas atšķirīgi. Difuzora mehāniskā masa M_{MD} un starojuma impedance mainās. Šīs izmaiņas notiek ļoti strauji un ir funkcija no frekvences. Šīs parādības matemātiski aprakstīt ir sarežģīti, turpretī ģeometriski gana vienkārši attēlojamas.

Ar „+” un „-” zīmi marķētie difuzora apgabali svārstās pretējās fāzēs. Izteikti tas ir redzams 12.11. att. a. Šī parādība ir saistīta ar difuzora konstrukciju,



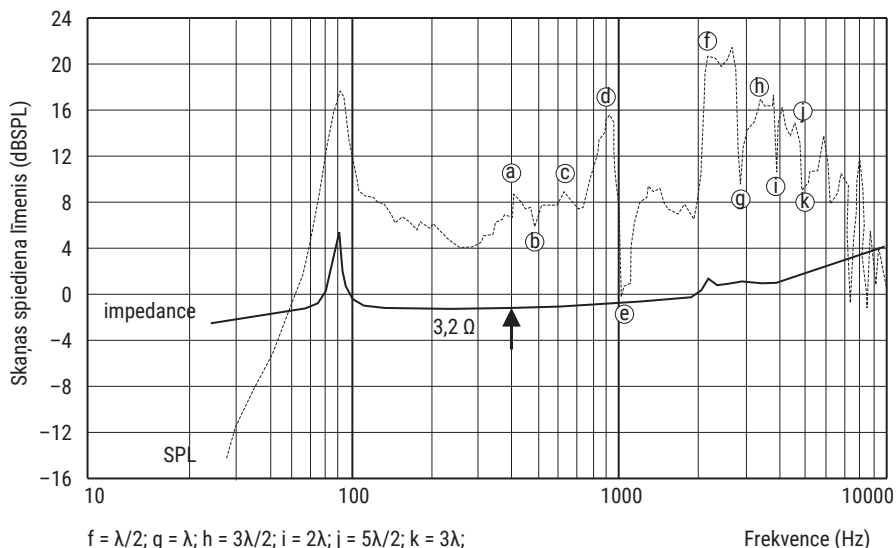
12.11. att. Difuzora atšķirīgo svārstību apgabali.

atsevišķo elementu ģeometriju, masu un izvēlēto materiālu fizikālajām īpašībām.

Frekvenču raksturlīknes formu lielā mērā ietekmē spolītes un difuzora masas attiecības, kā arī difuzora materiāls. Ietonētie sektori un riņķa līnijas attēlo difuzora svārstību apgabalus ar mazu amplitūdu.

Dalīto svārstību apgabalu pretējās fāzes esamība izraisa arī stāvviļņus, kuri lokāli izstaro lielu enerģiju, kas summējoties attālina frekvenču raksturlīkni no vēlami gludās.

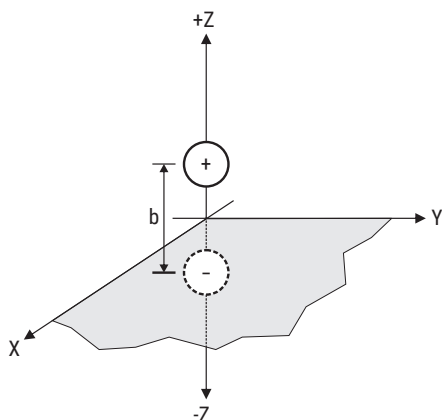
Stāvviļņi ar viļņa garumiem λ un to ienestā nevienmērība redzama 12.12. attēlā.



12.12. att. Stāvviļņi.

12.6. SKAĻRUŅA PARAMETRU MĒRĪŠANA

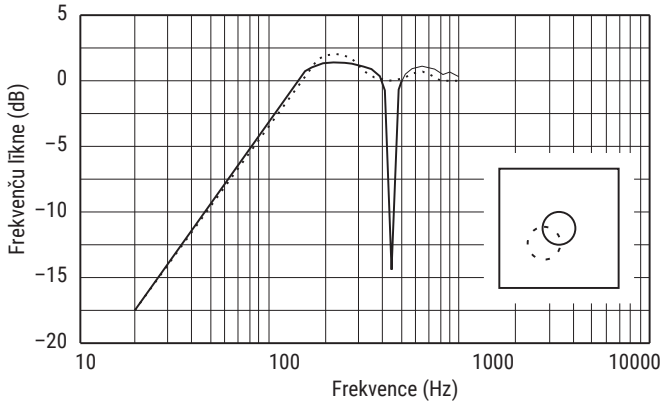
Viena no skaļruņa parametru mērīšanas metodēm paredz tā iestiprināšanu *bezgalīga izmēra panelī*. Ar jēdzienu *bezgalīgs panelis* ir domāti skaļruņa parametru mērīšanas apstākļi, kuros zemo frekvenču apgabalā tiek izslēgts akustiskais īsslēgums, t.i., nav mijiedarbības starp diafragmas priekšpusi un aizmugures izstarotajām svārstībām.



12.13. att. Difuzora dipols.

Skaļruņa difuzors principā ir dipols, kuru veido divi monopoli, kas svārstās ar vienādu frekvenci un amplitūdu, bet pretējās fāzēs (12.13. att.). Dipola izstarotā summārā jauda ir daudzkārt mazāka par atsevišķa monopola izstaroto jaudu.

Monopolu mijiedarbība tiek ierobežota, ja panelis atrodas plaknē x - y . Šāda paneļa praktiska izveide pie ļoti zemām frekvencēm, ņemot vērā viļņa λ garumu, ir apgrūtinoša. To var aizstāt ar liela tilpuma slēgtu skandu, kuras iekšpuse ir izklāta ar svārstības teicami absorbējošu materiālu. Šim tilpumam ir jābūt daudzkārt



12.14. att.
Frekvenču raksturlīknes formas maiņa, mainot skaļruņa novietojumu panelī.

lielākam par Tiles-Smola parametru V_{AS} . Tad difuzora aizmugures izstarotās svārstības atstārosies minimāli.

Ja skaļruņa parametri tomēr tiek mērīti galīga izmēra panelī, kur paneļa malu garumi vairākkārt pārsniedz zemākās frekvences viļņa garumu λ (standarts IEC 60268-5), tad skaļrunis panelī stiprinās asimetriski, lai mazinātu stāvviļņu nevēlamo efektu uz frekvenču raksturlīknes formu.

Kā mainās frekvenču raksturlīkne atkarībā no skaļruņa novietojuma galīga izmēra panelī (1,2 m · 1,2 m), redzams 12.14. attēlā.

12.7. SKAĻRUŅA JUTĪBA

Šis parametrs parāda, cik efektīvi skaļrunis tam pievadīto elektrisko enerģiju spēj pārveidot akustiskajā. Skaļrunis ar kustīgo spolīti nav īpaši efektīvs elektroakustiskais pārveidotājs. Tā lietderība ir ap **1 %**. Mērījumu veic dotā tipa skaļrunim atbilstošajā diapazonā. Iegūta tiek skaņas spiediena (*Sound Pressure Level*) raksturlīkne. Starptautiski šo parametru apzīmē kā **dB SPL**.

Veicot mērījumu, skaļrunim tiek pievadīts tik liels spriegums, lai uz tā spolītes izdalītos **1 W** liela jauda un mērmikrofons atrodas **1 m** attālumā no skaļruņa. Vislabāk to veikt bezatbalss kamerā.

Tātad pēc Oma likuma ir zināms, ka:

$$P = I \cdot U = \frac{U}{R} \cdot U = U^2 R. \quad (12.6.)$$

Ja nepieciešamais jaudas lielums ir **1 W**, un spolītes DC pretestība ir R , tad nosakam sprieguma lielumu:

$$U_{RMS} = \sqrt{(P \cdot R)}. \quad (12.7.)$$

Lielākoties skaļruņu DC pretestība ir **2 Ω, 4 Ω, 8 Ω** retāk **16 Ω**. Līdz ar to iegūstam šādus sprieguma lielumus:

- $U_{\text{RMS}(2)} = 1,41 \text{ V}$;
- $U_{\text{RMS}(4)} = 2,00 \text{ V}$;
- $U_{\text{RMS}(8)} = 2,83 \text{ V}$;
- $U_{\text{RMS}(16)} = 4,00 \text{ V}$.

Parametru „jutība” pieraksta šādi:

Jutība = XX dB SPL/W/m.

Tātad mēs runājam par skaņas spiediena līmeni **1 m** attālumā, nodrošinot skaļrunim **1 W** lielu signālu. Nevar gluži viennozīmīgi runāt par pievadīto jaudu **1 W**, jo tā ir atkarīga no impedances un frekvences. Skaļruņa impedance frekvenču diapazonā ir mainīgs lielums, Ja pie **1 kHz** tā ir **8 Ω**, tad pie **200 Hz** tā ir **2 Ω**. Ja sprieguma lielums ir nemainīgs – **2,83 V**, tad redzam, ka jaudas atšķiras **4** reizes. Iznāk, ka pie **1 kHz** skaļrunis ir **4x** jutīgāks nekā pie **200 Hz**.

Pastiprinātājs, kas darbina skaļruni, ir uzskatāms par konstanta sprieguma avotu, kurš nodrošina iestatīto sprieguma lielumu neatkarīgi no slodzes lieluma un patērētās strāvas. Un te ir atziņa, ka svarīga ir šī sprieguma jutība, nevis lietderība, proti, cik skaļi skaļrunis spēs atskaņot no pastiprinātāja pievadīto spriegumu. Tātad tas ir skaņas spiediena līmenis **1 m** attālumā no skaļruņa, ja tam pievada sprieguma lielumu, kurš pie dotās impedances izkļiedē **1 W** lielu jaudu. Skaļruņa jutība ir būtisks parametrs, kad izvēlas pastiprinātāju, proti, pastiprinātāja un skaļruņa salāgošana.

Ja pastiprinātāja jauda nav liela, piemēram, **20 W**, tad vēlams skaļrunis ar augstāku jutību, pretējā gadījumā audio sistēma skanēs klusi. Ja skaļruņa jutība ir augsta, ap **100 dB SPL/1 W/1 m**, tad var atļauties pastiprinātāju ar mazāku jaudu. Šajā piemērā ir domāti skaļruņi ar identisku pretestību.

12.8. SKAĻRUŅA ELEKTRISKĀ IEEJAS IMPEDANCE

Ja mēs ignorējam izstarošanas pretestību, kuras lielums ieejas impedanci ietekmē niecīgi, un apvienojam izstarojuma un mehānisko masu, tad iegūstam kopējo kustīgo masu:

$$M_{\text{MS}} = M_{\text{MD}} + 2M_{\text{M1}}, \quad (12.8.)$$

kur: M_{MD} – difuzora un spolītes masa;

M_{M1} – gaisa masa = $2,67a^3 \cdot \rho_0$;

a – difuzora diametrs;

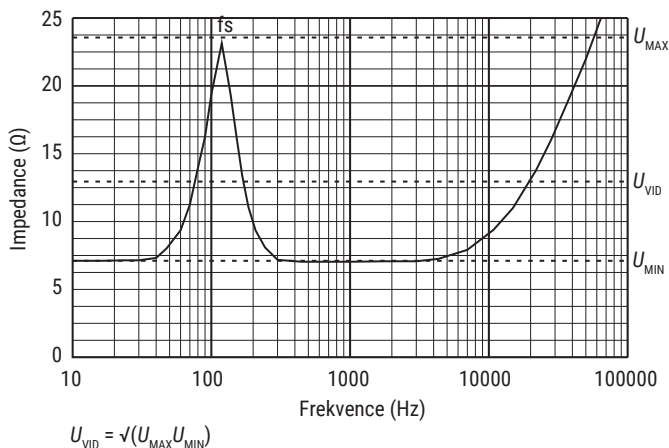
ρ_0 – gāzes blīvums.

Elektrisko ieejas impedanci Z_E raksturo šāda sakarība:

$$Z_E = Z_{\text{ES}} + Z_{\text{EM}}, \quad (12.9.)$$

kur: Z_{ES} – akustiskā impedance;

Z_{EM} – mehāniskā impedance.



12.15. att. Panelī nostiprināta skaļruņa elektriskā impedance.

Veicot elektriskās impedances mērījumus **100 mm** diametra skaļrunim, kas iestiprināts bezgalīgā panelī, iegūstam 12.15. att. līkni.

Skaļruņa svārstīgas sistēmas rezonanses pīķis f_s ir pie **125 Hz**. Ja ignorējam spolītes induktivitāti L_E , tad ieejas impedances lielumu pie f_s var uzrakstīt šādi:

$$Z_E = R_E + R_{ES}, \quad (12.10.)$$

kur: R_E – elektriskā pretestība līdzstrāvas gadījumā;

$R_{ES} = B^2 l^2 / R_{MS}$ – akustiskā pretestība;

B – magnētiskās plūsmas intensitāte spraugā;

l – spolītes tinuma garums;

R_{MS} – saspiešanas mehāniskā pretestība.

12.15. att. redzamais pīķis raksturo reizinājuma Bl faktora lielo ietekmi, tajā pašā laikā šis pīķis parāda, ka mehāniskā vājinājuma pretestība ir niecīga. Augstāku frekvenču apgabalā impedance pieaug, jo pieaug spolītes induktivitāte L_E . Zemo frekvenču apgabalā impedance raksturojas ar līdzstrāvas pretestību R_E un tās vērtība asimptotiski piekļaujas līknei. Šinī gadījumā tās vērtība ir **7 Ω**.

Par cik skaļruņu tehniskajos datos ir iespējams atrast lielumus Q_{MS} un Q_{ES} , tad R_{ES} var aprēķināt šādi:

$$R_{ES} = \frac{R_E \cdot Q_{MS}}{Q_{ES}}. \quad (12.11.)$$

Ja $Q_{MS} = 5$ un $Q_{ES} = 2,2$,
tad

$$Z_E = R_E + R_{ES} = \frac{R_E + R_E \cdot Q_{MS}}{Q_{ES}} = 7 + \frac{7 \cdot 5}{2,2} = 23 \Omega.$$

Tātad impedances lielums Z_E pie f_s ir **23 Ω**.

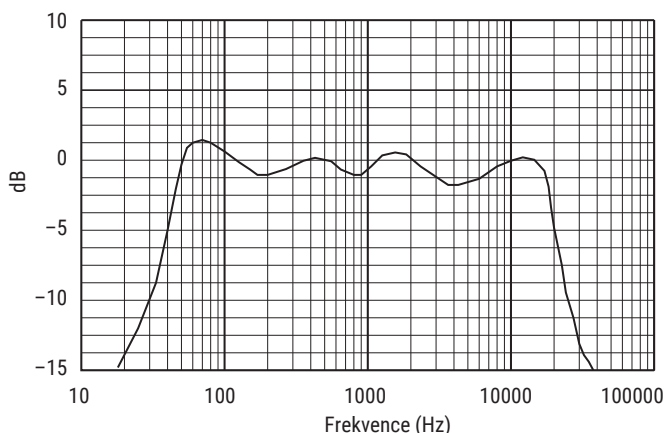
12.9. SKAĻRUŅA FREKVENČU RAKSTURLĪKNE UN SKANĒJUMA KVALITĀTE

Vai ir iespējams pateikt, kurš no skaļruņiem skan labāk. Vai tas, kura frekvenču raksturlīkne (12.16. att.) ir diapazonā no **45 Hz** līdz **18 kHz** vai 12.17. att. ar diapazonu no **20 Hz** līdz **25 kHz**. Jāteic nē. Ir pārlietu maz informācijas par šiem skaļruņiem, lai varētu spriest par skanējuma kvalitāti. Diemžēl nākas atzīt, ka ļoti daudzi iegādājas skaļruņus, izvēloties tos tikai pēc frekvenču raksturlīknes.

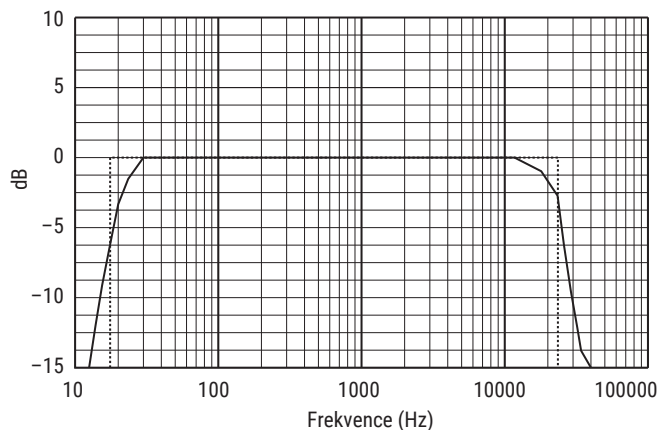
Mēģināsim vairāk uzzināt par skaļruņiem A, B, C, D, E, kuru raksturlīknes ir dotas no 12.16. att. līdz 12.20. att. Frekvenču raksturlīkne parāda to frekvenču vai mūzikas toņu atskaņošanas diapazonu, kuru var nodrošināt konkrētais skaļruņa modelis. Ir vispārīgs pieņēmums, ka cilvēka dzirdes diapazons ir no **20 Hz** basiem līdz **20 kHz** augstajiem toņiem.

Skaļrunis, kas to nodrošina, tiek uzskatīts par teicamu. Diemžēl jāteic, ka tas nav garantēts. Svarīgs nav frekvenču diapazons, kurā skaļrunis spēj svārstīties, bet gan skaļruņa spēja atskaņot frekvences vai toņus tādā pat līmenī un attiecībās, kādā tie tika ierakstīti vai tiek pievadīti skaļrunim. Svarīgs faktors ir skaļruņa radītie nelineārie kropļojumi.

Mēs nevēlamies, lai skaļrunis sāktu uzvesties kā mikserpults, proti, izmainītu mūzikas instrumentu vai balss tembru, padarot tos nedabiskus. Ja tiek veikts audiosignālu ieraksts ar nemainīgu līmeni, tad, atskaņojot to caur skaļruni, līmenim ir jābūt nemainīgam. Šis ir viens no skaļruņa frekvenču raksturlīknes mērīšanas paņēmieniem. Bezatbalss kamerā skaļruņa priekšā uz tā akustiskās ass novieto kalibrētu mērmikrofonu un iegūto signālu uzzīmē kā frekvenču amplitūdas raksturlīkni A.



12.16. att.
Raksturlīkne A.



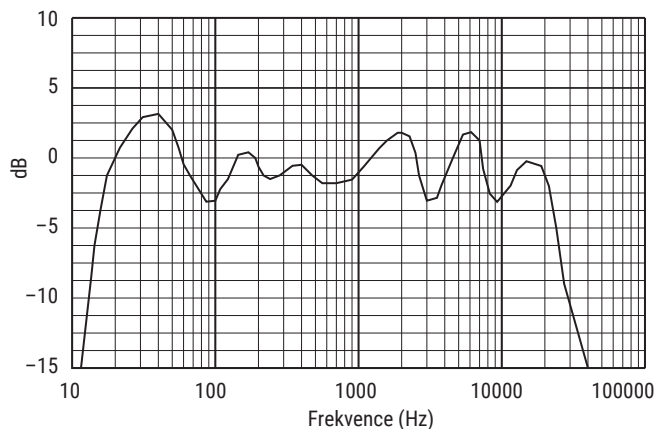
12.17. att.
Raksturlīkne B.

Aplūkosim raksturlīkni B. Tā ir plakana, taču tas nenozīmē, ka visi toņi tiks atskaņoti vienā līmenī. Skaļrunis ar šādu raksturlīkni, atskaņojot toņus, saglabās savstarpējās attiecības tādā pat attiecībā kā pie ieraksta. Šāds skaļrunis atskaņojumu veiks precīzi, saglabājot dabisko oriģinālo skanējumu.

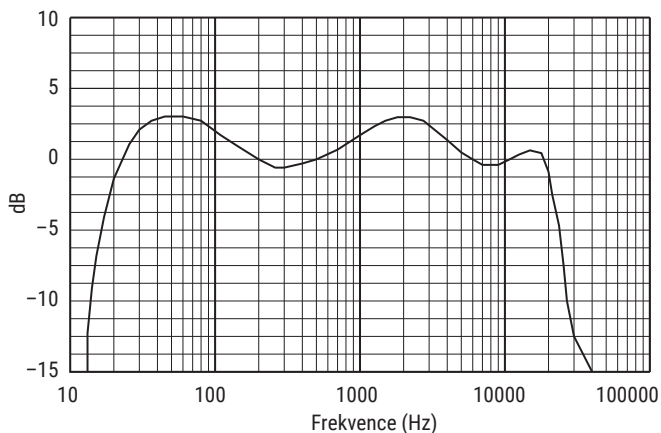
Plakana raksturlīkne – tas ir izcili. Diemžēl realitāte ir tāda, ka šādu skaļruņu nav un nav paredzams, ka tuvākajā laikā tādi tiks izgatavoti. Tas ir teorētisks modelis.

Aplūkosim skaļruņu amplitūdas-frekvenču raksturlīknes, kādas tās ir sastopamas realitātē.

Liels sasniegums būtu, ja varētu iegūt frekvenču raksturlīkni diapazonā no **XX Hz līdz YY kHz** ar svārstībām **+/-3 dB**. Tas nozīmētu, ka amplitūdas svārstības no centrālās horizontālās norādītajā frekvenču diapazonā nepārsniedz **+/-3 dB**. Amplitūdas svārstību līmenis **3 dB** ir tas lielums, kura robežās cilvēka



12.18. att.
Raksturlīkne C.

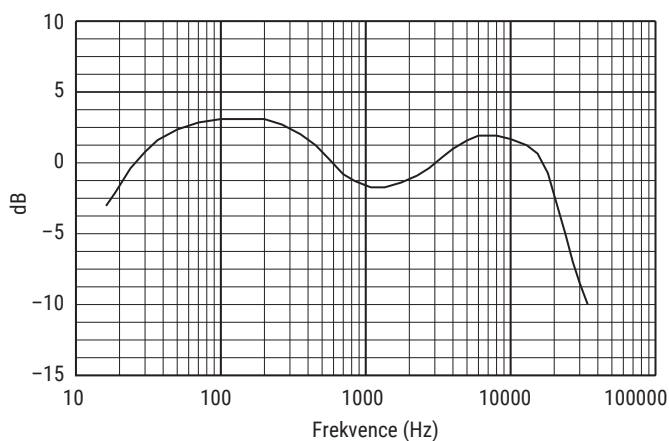


12.19. att.
Raksturlīkne D.

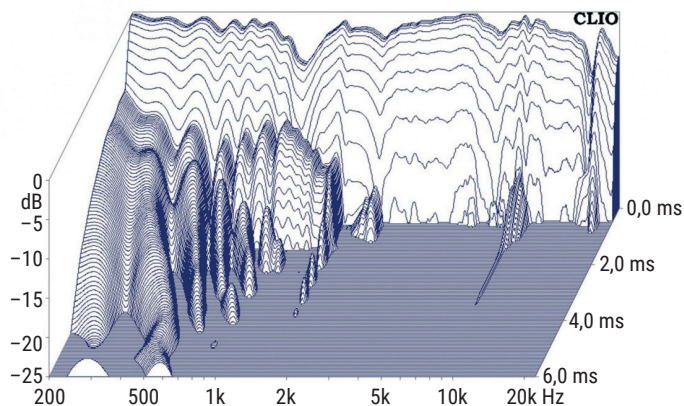
dzirdē vēl neuztver būtiskas izmaiņas, un šādu skaļruņi varētu uzskatīt par teicamu (12.18. att.). Palūkosimies, vai tas tā patiesi ir.

Raksturlīkne D arī atbilst nosacījumam: atrasties svārstību diapazonā ± 3 dB. Tātad secinājums, ka skaļruņi D un C skan līdzīgi, diemžēl tā nav. Skaļrunim C ir izteikts *viens notes* bass un atskaņo balsi un instrumentus nedabiski. Savukārt skaļrunis D skan līdzīgāk un ir dabiskāks. Ja skaļruņus C un D vērtē pēc amplitūdas-frekvenču raksturlīknes, tad priekšroka ir dodama skaļrunim D. Tā raksturlīknes svārstības ir plūdenākas un mierīgākas. Raksturlīknes C izmaiņas ir asākas un biežākas.

Prakse rāda, ka šādu skaļruņu radītā skaņa ir nogurdinoša. Tā ir mazāk tīkama un, subjektīvi vērtējot, mazāk precīza.



12.20. att.
Raksturlīkne E.



12.21. att. Skaļruņa trīs dimensiju mērījums.

Aplūkosim skaļruni ar raksturlīkni E. Tā ir relatīvi gluda, raksturlīknes svārstības ir plūdenas plašā diapazonā un to nav daudz. Ir sagaidāms dabīgs skanējums. Te ir bagātīgi basi, izcilas augšas un nedaudz iegremdēts vidus.

Audiofili šo raksturlīkni sauc par *smaidiņu*. Taču jāpiebilst, ka tas negarantē, ka skaņa patiks, bet tas noteikti strādā uz *mazāk informētu* pircēju.

Iegūtā informācija par skaļruni, lai izvērtētu tā kvalitāti, ja esam veikuši tikai frekvenču amplitūdas raksturlīknes mērījumus, nav pietiekama. Arī mērīšanas tehnoloģijas attīstās strauji, piedāvājot jaunas iespējas.

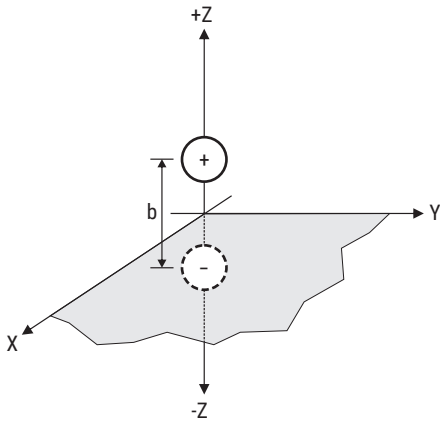
Līdzšinējo divdimensiālo mērījumu klāstam x - y ass klāt nāk trešā – z ass –, laika mērījumi (12.21. att). Ja skaļrunim pievada impulsu, tad tā svārstības nebeidzas līdz ar impulsa pazušānu. Tas turpina svārstīties un veidot patstāvīgu skaņu, kura nebūt nav oriģinālā. Tas ir slikti. Ir virkne datu apstrādes un analīzes programmu, kuras, veicot audiosignāla ierakstu, to analizē arī laika dimensijā.

Tādējādi ir iespējams aplūkot frekvenču amplitūdas raksturlīkni dažādos laika momentos pēc signāla noņemšanas. Jo pilnīgāks ir mērījumu klāsts, jo ir lielākas analīzes iespējas skaļruņu projektētājiem.

12.10. AKUSTISKAIS PANELIS UN KORPUSS

Jebkurš motoriskais pārveidotājs, kas ar diafragmas vai difuzora starpniecību ģenerē skaņu, būtībā ir divvirzienu starotājs, jo gaisa daļiņas iekustina svārstīgās virsmas abas puses. Lielākoties starotāja ģeometriskie izmēri ir daudzkārt mazāki par viļņa garumu, un difrakcijas rezultātā veidojas akustiskais īsslēgums.

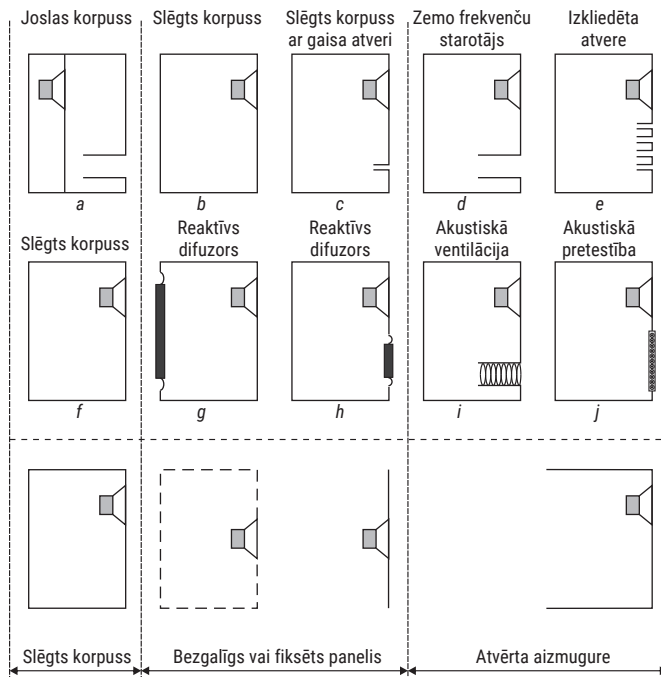
Viļņu izstarošana ir līdzīga kā dipola gadījumā, kur pretējie poli ir novietoti netālu viens no otra, tie svārstās vienā frekvencē, ar vienādu tilpuma ātrumu, bet ir pretfāzē (12.22. att.).



12.22. att. Dipols un panelis.

Dipols ir neefektīvs starotājs. Ar tā efekta radīto problēmu nākas sastapties inženieriem, risinot gan trokšņu, gan audio problēmas. Īsslēgtai diafragmai zemo frekvenču diapozonā ir nepieciešama liela svārstību amplitūda, lai nodrošinātu adekvātu skaņas spiediena līmeni dotajā telpā.

Šo amplitūdu ierobežo tīri praktiski apsvērumi, un tas arī ir saistīts ar lieliem nelineārajiem kropļojumiem. Lai nepieļautu akustiskā īsslēguma veidošanos, izmanto paneļus, kastes un citus risinājumus. Panelis atrodas plaknē x - y , (12.22. att.).



12.23. att. Skandu konstrukcijas:

a – akustiskā pretdarbība un zemfrekvences filtrs; b – akustiskā pretdarbība; c – neliela gaisa plūsmas atvere; d – atstarotā gaisa masa zemajām frekvencēm; e – daudzas nelielas atveres; f – haotiskas korpusa sienu svārstības; g – smags reaktīvais difuzors un nelielas svārstības; h – smags reaktīvais difuzors – tas var būt arī elektriski nepievienots skaļrunis; i – porains skaņas absorbents; j – porains skaņas absorbents vai akustiskais audums.

Populārākie skandu konstrukciju veidi ir:

- slēgtās kastes (akustiskā kompresija). Tās var būt ar nelielu tilpumu, kurās nav kastes iekšējās akustiskās rezonanses skaļruņa darba diapazonā, un ar lielu tilpumu, kur ir novērojama rezonanses parādība;
- parazitiskie rezonatori. Tie var būt fāzgriezēja caurules, pasīvie starotāji;
- akustiskie filtri;
- akustiskie transformatori.

Ir dažādas skandu konstrukcijas, kuras ļauj ierobežot akustiskā īsslēguma veidošanos (12.23. att.).

12.11. BEZGALĪGA IZMĒRA PANELIS

Ja skaļrunis ir nostiprināts sienā, kas atdala divas lielas telpas, tad šo sienu var uzskatīt par bezgalīgu paneli. Dažkārt, modelējot kādu lielu un ietilpīgu mēbeli, to var uzskatīt par otro telpu. Ja otrajai telpai ir labas skaņu absorbējošās īpašības, tad frekvenču diapazonā, kas ir krietni zem telpas rezonanses frekvences, skaļrunim šī telpa *izskatās* bezgalīgi liela. Ja šī otrā telpa ir liela un absorbējoša, tad skaļruņa aizmugures izstarotās skaņas otrajā telpā atstarosies ļoti maz, to amplitūda būs niecīga un tās nebūs dzirdamas caur skaļruni.

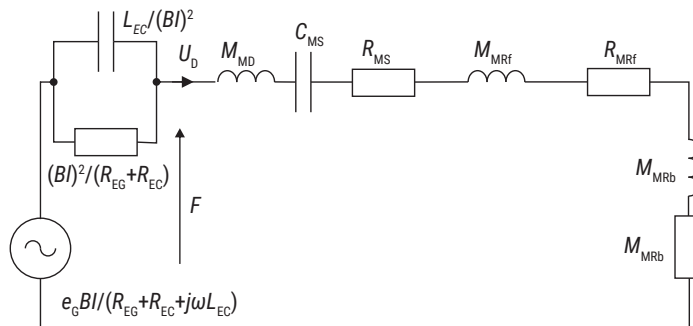
Tomēr der atcerēties, ka skaļrunis ir slikts skaņas izolators. No skaņas izolācijas viedokļa raugoties, jāteic, ka tas ir kā caurums sienā.

12.12. SLĒGTS KORPUSS

Slēgtas kastes veida skandas ir populārākā konstrukcija un bieži kalpo kā izejas punkts daudz sarežģītākām konstrukcijām. Skaņas lauks skandās raksturojas ar rezonanses režīmiem – modām, līdzīgi kā skaņas lauks telpās.

Telpu rezonanses režīmus apskata režīmu teorija. Tā kā skandu izmēri lielākoties ir daudzkārt mazāki par telpu izmēriem, tad to rezonanses režīmi frekvenču diapazonā atrodas augstāk. Jāpiebilst, ka rezonanse skaņas laukā piemīt jebkuras formas telpai un skandai.

Skandas, kuras ir izveidotas kā slēgtas kastes vai ar fāzu invertoriem, vai kā savādāk ventilējamas, parasti ir paredzētas skaņas reproducēšanai frekvenču diapazonā, kas ir krietni zem kastes pirmās modas. Cietā, slēgtā korpusā ļoti zemo frekvenču apgabalā akustiskās impedances īpašības raksturo akustiskā elastība C_{AB} . Tā kā korpusa sienu skaņas absorbcijas spēja ir saistīta ar porainību, zudumiem vibrācijā, gaisa masas sūknēšanu locījumu vietās, noplūdēm utt., kā arī no korpusa iekšienē esoša akustiskā absorbenta, tad ir iespējami



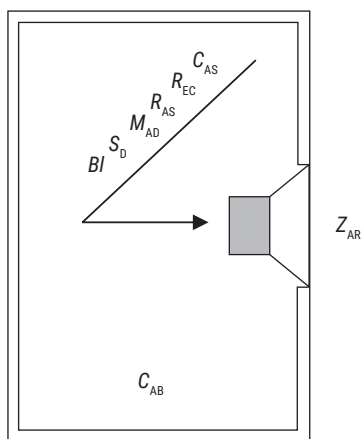
12.24. att. Galīga izmēra panelī nostiprināta skaļruņa elektroakustiskā analogija:
 R_{MRF} , R_{MRb} – priekšpusē un aizmugurē starojuma impedances reālā daļa; M_{MRF} , M_{MRb} – priekšpusē un aizmugurē mehāniskā starojuma masa; R_{MS} – mehāniskās saspiešanas impedance; ω – leņķiskā frekvence ($2\pi f$ rad/s); R_{EG} – ģenerators izejas pretestība; C_{MS} – difuzora mehāniskā elastība; B – magnētiskās plūsmas blīvums; M_{MD} – difuzora mehāniskā masa; U_D – difuzora tilpuma ātrums; e_g – ģenerators spriegums; L_{EC} – spolītes induktivitāte; R_{EC} – spolītes pretestība; l – spolītes garums.

vairāki akustiskās rezistances nosacījumi, kurus ir grūti iepriekš definēt skandas projektēšanas gaitā.

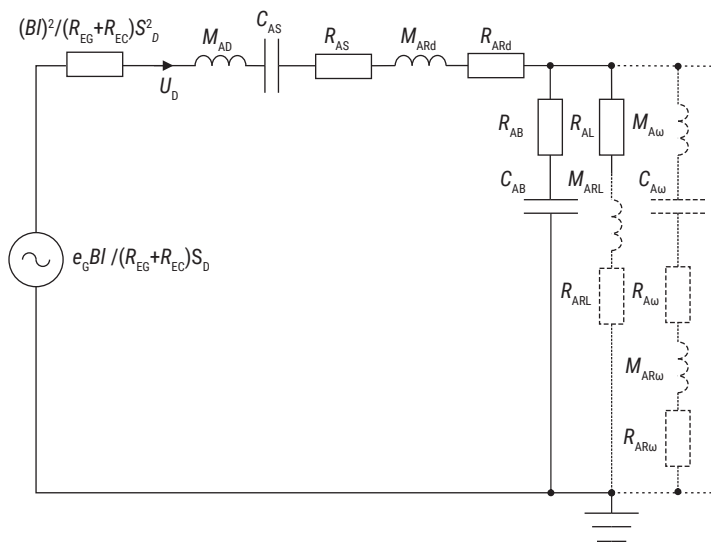
12.24. att. redzama mehāniskās impedances analogija skaļrunim, kas iestiprināts galīga izmēra panelī. Shēmā ietvertas paneļa priekšpusē R_{MRF} , M_{MRF} un aizmugurē R_{MRb} , M_{MRb} starojuma impedances komponentes.

Ja galīga izmēra paneļa aizmugurē puses starojuma impedances komponentes aizvieto ar slēgta korpusa impedances komponentēm, tad iegūstam 12.25. att. redzamo korpusu un tā komponentes.

Slēgta korpusa elektroakustiskā analogija redzama 12.26. attēlā.



12.25. att. Slēgtā korpusa komponentes:
 Z_{AR} – starojuma impedance = $R_{AR} + j\omega M_{AR}$;
 C_{AB} – korpusa tilpuma akustiskā elastība;
 R_{AS} – akustiskās saspiešanas pretestība;
 C_{AS} – akustiskās saspiešanas elastība; R_{AR} – akustiskā starojuma pretestība; R_{EC} – spolītes elektriskā pretestība; ω – leņķiskā frekvence ($2\pi f$ rad/s); M_{AR} – akustiskā starojuma masa; M_{AD} – difuzora akustiskā masa; S_D – difuzora laukums; $B l$ – magnētiskā spēka lielums.



12.26. att. Slēgta korpasa akustiskās impedances analogija. Difuzora starojuma un korpasa tilpuma slodzes impedances komponentes:

R – no frekvences atkarīga pretestība; R_{ARd} – skaļruņa akustiskā starojuma pretestība; R_{AB} – korpasa iekšpuses akustiskā pretestība; R_{AL} – korpasa noplūdes akustiskā pretestība; M_{ARd} – skaļruņa akustiskā starojuma masa; C_{AB} – korpasa tilpuma akustiskā elastība; R_{AS} – akustiskās saspiešanas pretestība; C_{AS} – akustiskās saspiešanas elastība; R_{EG} – ģenerators izejas pretestība; B – magnētiskās plūsmas blīvums; S_D – difuzora laukuma pretestība; M_{AD} – difuzora akustiskā masa; U_D – difuzora tilpuma ātrums; e_g – ģenerators spriegums; l – spolītes garums; R_{EC} – spolītes.

Visi elementi veido virknes slēgumu. Ar pārtrauktām līnijām attēloti elementi, kas reprezentē zudumus, saistītus ar korpasa sienu svārstībām un rezonansi. To simbols ir R_{AL} . Tie ir mazi salīdzinājumā ar korpasa tilpumu un, veicot aprēķinus, tos var neņemt vērā.

Redzamajā slēgumā korpasa akustiskās īpašības attēlo divas komponentes – C_{AB} elastību un R_{AB} zudumus korpūsā.



ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅAM

1. Vai skaļrunis ir lineārs elektromotors?
2. Pēc kādiem parametriem var iedalīt skaļruņus?
3. Kā ir uzbūvēts skaļrunis?
4. Kas zināms par elektriskās spolītes konstrukciju un materiāliem?
5. Vai skaļruņa spolīti var dzesēt ar šķidrumu?

6. Kā izmainās skaļruņa rezonanses frekvence, ja to ievieto skandā?
7. No kādiem materiāliem gatavo difuzoru?
8. Kas ir Tīles-Smola parametri?
9. Vai difuzora ģeometriskā forma ir frekvenču atkarīgs lielums?
10. Kā tiek mērīti skaļruņa akustiskie parametri?
11. Kas ir akustiskais īsslēgums?
12. Kas ir skaļruņa jutība un kā to mēra?
13. Vai skaļruņa frekvenču diapazona raksturlīkne ir pietiekams tā raksturlielums?
14. Kādai ir jābūt skaļruņa galvenajai funkcijai?
15. Kādi skandu konstrukciju iedalījumi ir zināmi?
16. Vai skaļruņi var izmantot kā mikrofonu?

AUSTIŅAS



13

- 13.1. Austiņu iedalījums
- 13.2. Austiņu konstrukcija
- 13.3. Akustiskā vide
- 13.4. Lektrodinamiskās austiņas
- 13.5. Elektrostatiskās austiņas



Atmiņas un prāta treniņam

Tādas personālās skaņas klausīšanās ierīces kā ārējās un ausī ievietojamās austiņas (turpmāk – austiņas) netiek analizētas kontekstā ar tradicionālo akustisko vidi.

Par cik klausīšanās telpa tiek izslēgta no atskaņošanas trakta, tad atskaņoto skaņu var uzskatīt par vairāk atbilstošu sākotnējai. Austiņas attīsta relatīvi nelielu tilpuma ātrumu, līdz ar to mazāki ir arī nelineārie kropļojumi salīdzinājumā ar skaļruņiem.

Kā viens no personālo klausīšanās ierīču trūkumiem ir jāmin statistiskais skaņas lauks ap klausītāja galvu: klausītājs pārvietojas un klausās, bet skaņas lauks ir nemainīgs attiecībā pret galvu, turpretim, ja tiek izmantoti skaļruņi, tad skaņas lauks ir viena no akustiskās vides komponentēm. Turklāt austiņas slāpē apkārtējās vides skaņu.

Turpmākajā izklāstā neaplūkosi šos efektus, bet gan izvērtēsim skaņas reproducēšanas tehniskos aspektus austiņās.

Austiņu omiskās pretestības diapazons ir gana plašs – no 16 līdz pat 250 Ω un vairāk. Mobilajās, plaša patēriņa skaņu ierīcēs, kur enerģijas avota resursi ir ierobežoti, ieteicams lietot mazomīgās ierīces. Savukārt augstomīgās tiek izmantotas profesionālajā audio industrijā.

Šeit pastiprinātāju izejas jaudas lielums nav tik ierobežots. Ieguvums ir atskaņotās skaņas kvalitāte. Kā vērtēšanas kritēriji ir minams dinamiskais diapazons – trokšņu un lietderīgā signāla attiecība, paplašināta zemo frekvenču josla.

13.1. AUSTIŅU IEDALĪJUMS

Ir daudz un dažādu tipu austiņas, tāpēc tās ir klasificētas pēc konstrukcijas, lai būtu ērtāk aplūkot un analizēt (13.1. att.).

Pēc austiņu novietojuma pie auss, tās tiek iedalītas divās grupās:

- aptverošās;
- ārējās.

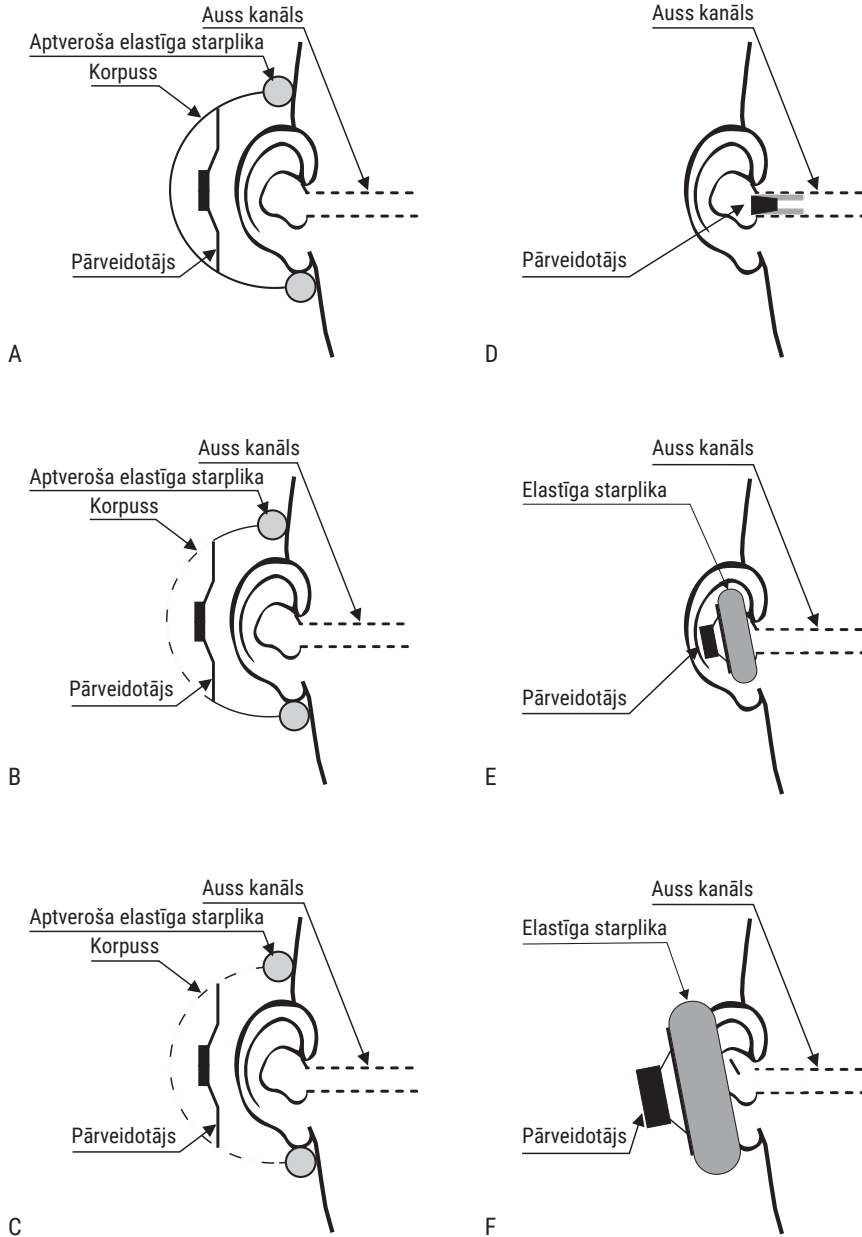
Aptverošo austiņu korpusā var būt iestiprināts viens vai arī vairāki pārveidotāji, un korpusss nodrošina hermētiski blīvu stiprinājumu pie klausītāja galvas.

Aptverošo austiņu korpusss var būt gan atvērts, gan slēgts.

Slēgtais korpusss izolē ārējos trokšņus, bet rezonanse starp korpusa masu un stiprinājuma stīpas elastību (*compliance*) vājina zemo frekvenču izolāciju.

Ja ir atvērta veida korpusss, tad nenotiek skaņas izolācija un iesaistās apkārtējā vide, un skaņa kļūst dabiskāka.

Ārējās austiņas piespiežas pie galvas ar skaņas caurlaidīgu, mīkstu starpliku, kas klausītājam varētu būt komfortablāk, un tās neizolē ārējo akustisko vidi.



13.1. att. Austiņu tipi: a – aptveroša austiņa, slēgts korpuss; b – aptveroša austiņa, daļēji slēgts korpuss; c – aptveroša austiņa, vaļņs korpuss; d – ausī ievietota austiņa; e – ārējā austiņa kanāla galā; f – ārējā austiņa pie auss.

Gan aptverošās, gan ārējās austiņas tiek novietotas tuvu pie auss kanāla. Savukārt ausī ievietojamās austiņas tiek ievietotas kanāla vaļējā galā un būtiski izolē apkārtējās akustiskās telpas ietekmi.

Visi skaļruņu tipi var tikt izmantoti austiņās, kaut gan daži no tiem ir nepraktiski, jo tiem nepieciešams liels spriegums, tiem ir liela masa un tie ir jutīgi pret mitrumu un netīrumiem. Austiņu masa ir būtisks faktors, kas jāņem vērā, jo lietotājs ar tām vai nu staigā, vai skrien.

Populārākie pārveidotāju tipi personālajām skaņas klausīšanās ierīcēm ir elektrodinamiskie un elektromagnētiskie pārveidotāji. Savukārt tos iedala pēc impedances – augstomīgi un zemomīgi.

Ārējās un ausī ievietojamās austiņas var tikt papildinātas ar aktīvu ārējās vides trokšņu slāpēšanas slēgumu-shēmu.

Proti, ja ir mikrofons un signālprocesors, tad no apkārtējās vides var uztvert sarunvalodu, svarīgus signālus, bet bloķēt trokšņus. Savukārt, ja auss kanālam ir jābūt brīvam, vai to nevar izmantot, ir jālieto personālā dzirdes ierīce skaņas aizvadišanai caur kaulu.

13.2. AUSTIŅU KONSTRUKCIJA

Pirms aplūkojam austiņu konstruktīvās īpatnības, izvērtēsim klausītāja un skaņas mijiedarbību plašā telpā.

Austiņu frekvenču raksturlīknei jābūt piemērotai klausāmajām skaņām. Ja klausāmie skaņu telpā, kuru atskaņo skaļruņi, dzirdes izjūtas veidojas no tiešās skaņas, pirmā atstarojuma un reverberācijas. Tā kā dzīvojamajās telpās reverberācijas laiks ir neliels, dominējošās ir tiešā skaņa un pirmais atstarojums.

Skaņas raksturs klausītāja ausīs ir atkarīgs no:

- izvēlēto skaļruņu (skandu) tipa;
- skaļruņu (skandu) frekvenču raksturlīknes;
- atstarojošo virsmu īpašībām;
- skaņas dispersijas no priekšmetiem telpā utt.

Tāpat skaņu ietekmē arī klausītāja ķermeņa un galvas atstarojumi.

Skaņas raksturu klausītāja ausī ietekmē arī skaņas viļņu krišanas leņķis attiecībā pret klausītāju. Dažādi krišanas leņķi ierosina dažādas rezonanses auss gliemežnīcā un auss kanālā.

Zināma līdzība ar elektroniskās antenas virziendiagrammu.

Diemžēl modelēšana nespēj pilnībā nodrošināt reālo vidi – tādu, kāda veidojas, kad austiņas atrodas pie klausītāja ausīm.

Galvas pārvades funkcijas (*Head-Related Transfer Function – HRTF*) apraksta un parāda klausītāja uztverto skaņas viļņu ietekmi uz galvu un ķermeni. *HRTF* kompleksā veidā noteic plakānu viļņu skaņas spiedienu katrā klausītāja ausī,

klausītājam klātneesot. Bieži kā sinonīms tiek izmantota impulsa reakcijas funkcija kopā ar Furjē transformācijām.

Katram individuam ir sava *HRTF*, caur kuru tas uztver binaurālo skaņu, veido savu skaņas telpu ap galvu.

HRTFs mērījumi ir sarežģīti, jo nav vispārīgas vienošanās par punktu, kurā, jeb ap kuru, ausī veikt mērījumus. Saprātīga vieta mērījumiem ir auss kanāla ieeja, kuru var izmantot kā atskaites vietu datu mērījumiem un reģistrācijai.

Veicot praktiskos *HRTFs* mērījumus, izmanto nelielu skaņas avotu ar nelielu difrakciju, kas nodrošina vienmērīgu sfērisku viļņu skaņas lauku **1,5–2 m** attālumā no klausītāja.

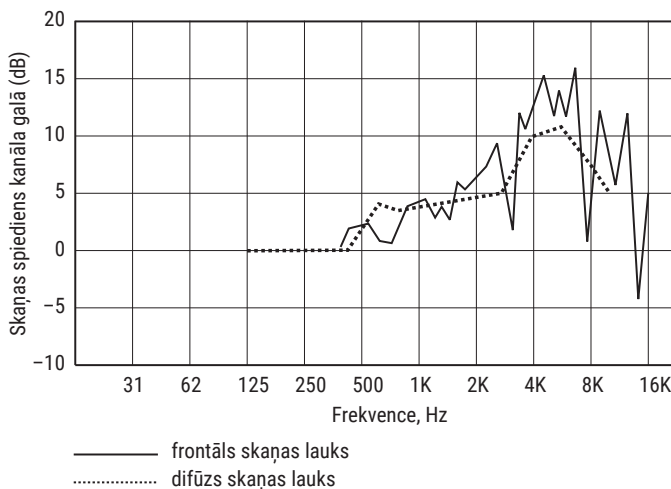
Jāpiebilst, ka viļņu lauka izliekums šajā un lielākos attālumos maz ietekmē *HRTF* mērījumus. *HRTF* mērījumus būtiski ietekmē viļņu krišanas leņķis. Katram krišanas leņķim ir sava unikāla *HRTF* funkcija.

Klausoties dabiskas izcelsmes vai reproducētu skaņu, dzirde balstās uz individuālās *HRTF* īpašībām. Piemēram, klausītājs un stereo skandas veido vienādsānu trīsstūri.

Skaņu, kas ir ierakstīta ar mikrofonu, kuram ir plakana frekvenču raksturlīkne, atskaņo caur skandām klausītājam priekšplānā (frontāli). Ja skandu vērsuma leņķi pret klausītāju maina, tad skaņa katrā situācijā izklausīsies savādāk. Frekvenču raksturlīkni ietekmē arī indivīda ķermeņa.

13.02. att. redzama *HRTF* frontāla frekvenču raksturlīkne un raksturlīkne difūzā laukā. Mērījums veikts manekena galvas vienā ausī.

Frontālais mērījums ir veikts bezatbalss kamerā tuvajā laukā, savukārt difūzais mērījums ir veikts reverberācijas kamerā difūzā laukā bez manekena ķermeņa un galvas. Ja reverberācijas kamerā ievietotu ķermeni un galvu, pieaugtu spiediena līmenis **250 Hz** apgabalā. Mērījumi veikti ar **1/3** oktāvas soli.



13.2. att. *HRTFs* frekvenču līkne.

Kā redzams, frekvenču raksturlīknes ne tuvu nav lineāras. Taču austiņu projektētāju mērķis nebūt nav iegūt lineāru līkni. Daudzām komerciāli veiksmīgām austiņām frekvenču raksturlīkne ir kā difūzajā laukā mērījumos iegūtā.

Austiņām jāspēj atskaņot signāla pīķus ar iespējami mazākiem kropļojumiem un elastīgi ierobežot, lai samazinātu riskus apdraudēt dzirdi. Strikta ierobežošana var izraisīt nelineāros kropļojumus, kas, protams, nav pieļaujami. Ir arī citi faktori, kuri jāņem vērā, izstrādājot austiņas.

Austiņu nelielie nelineāri kropļojumi ļauj sasniegt skaņas līmeni, kādu nevar atļauties, izmantojot skaļruņus. Reverberācijas telpas neesamība veicina šādu praksi, jo īsi muzikālie pīķi netiek uztverti tik skaļi kā tas notiktu reverberējošā telpā. Popmūzikā elektriskie mūzikas instrumenti, piemēram, elektriskā ģitāra, spēj radīt ievērojamus skaņas līmeņa pīķus ar skanēšanas ilgumu līdz pat dažām milisekundēm un vairāk.

Šādi pīķi netiek uztverti tik skaļi kā ilgstošs tonis ar tādu pat līmeni. Piemēram, ja ir **5 ms** ilgs **1 kHz** toņa impulss, tad uztvertā līmeņa rezerve ir ap **20 dB**, kaut gan tas būs par **10–20 dB** vairāk nekā klausoties skaļruni.

Ja klausītājs noregulē atskaņotās skaņas vidējo skaļuma līmeni abām ierīcēm subjektīvi apmierinošu vienādu, tad pīķi austiņās izklausīsies daudz skaļāki nekā skaļrunī. Īsi skaņas impulsi, visticamāk, palielinās risku pieaugt dzirdes traucējumiem vai pat bojājumiem.

Šī ir nopietna problēma arī mobilo telefonu lietotājiem, kuri klausās mūziku, izmantojot austiņas. Šo risku varētu mazināt, ja signālķēdē tiktu veikta skaņas apstrāde, detektējot pīķus, bet diemžēl tas nav praktiski.

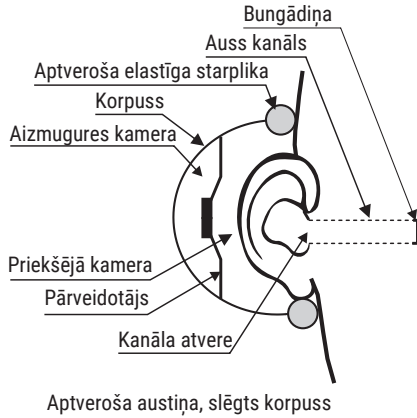
Ja lietojot austiņas klausās ar vienu ausi, tad ir nepieciešams apmēram par **10 dB** lielāks skaņas spiediena līmenis, nekā klausoties ar abām ausīm, lai sasniegtu to pašu subjektīvo skaļuma izjūtu. Tas palielina traumas gūšanas risku *aktīvajai* ausij.

13.3. AKUSTISKĀ VIDE

Personālo klausīšanās ierīču izstrādātājus interesē divi akustisko slodžu tipi. Tās ir slēgtās aptverošās austiņas un ausī ievietojamās austiņas, kas būtībā ir mazs slēgts tilpums ar nelielu noplūdi.

Indivīda galvas forma, mati, briļļu kājas, noplūde ir lielākās aptverošo slēgto austiņu problēmas. Ir grūti simulēt cilvēka ādu. Ausī ievietojamās austiņas šīs problēmas neskar.

Ārējās un ievietojamās austiņas strādā līdzīgi kā dipols atklātā telpā, tikai šinī gadījumā klausīšanās distance ir minimāla. Austiņu dimensijas lielākoties ir daudzkārt mazākas par lielāko daļu audio diapazona frekvenču viļņu garumiem. Tas nozīmē, ka pārveidotāju atkarībā no konstrukcijas ar zināmu tuvinājumu var pieņemt par ideālu virzuli, kas maina telpas tilpumu. Tilpuma impedanci, ar kuru jā sastopas pārveidotājam, var aprakstīt kā slēgta tilpuma



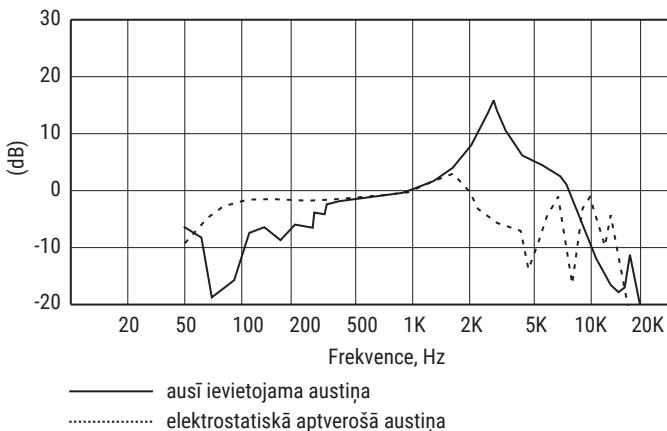
13.3. att. Korpus, pārveidotājs un auss.

dei starp galvu un ausiņām.

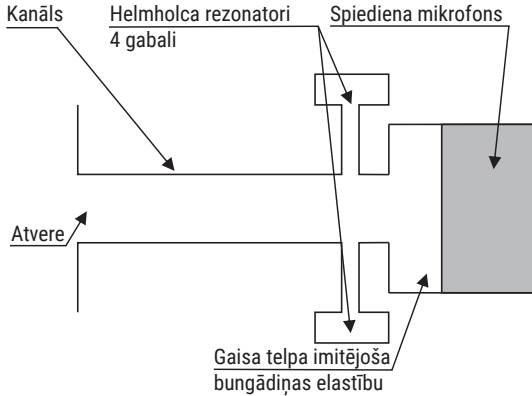
Stīpas elastība un ausiņu masa var rezonēt. Ja tas notiek, tad tas ir dažu simtu Hz diapazonā. Aptverošais korpus var būt tukšs vai arī pildīts ar kādu skaņu absorbējošu materiālu. Ja korpus ir tukšs, ir grūti izvairīties no stingras modālas skaņas uzvedības priekšējā kamerā (13.3. att.).

13.4. att. redzama frekvenču raksturlīkne slēgta tipa elektrostatiskajai ausiņai ar lielu diafragmu. Redzams, ka par spīti lielajai diafragmai, kura svārsta tilpumu no vienas puses, ir stingra modālā līkne virs **3 kHz**.

Ja ir perfekta mākslīgā auss vai mākslīgais kanāls (turpmāk mērkanāls), ir iespējams iegūt precīzu ausiņu frekvenču raksturlīkni. Daudzi mērkanāli ir paredzēti mērījumiem telefonijā un nav atbilstoši auss akustiskajām īpatnībām audiofrekvenču diapazona mērījumos (13.5. att.).



13.4. att. Kvalitatīvu ausiņu mērījumi ar maza tilpuma mērkanālu, lai izvairītos no auss kanāla impedances.



13.5. att. Mērkanāls.

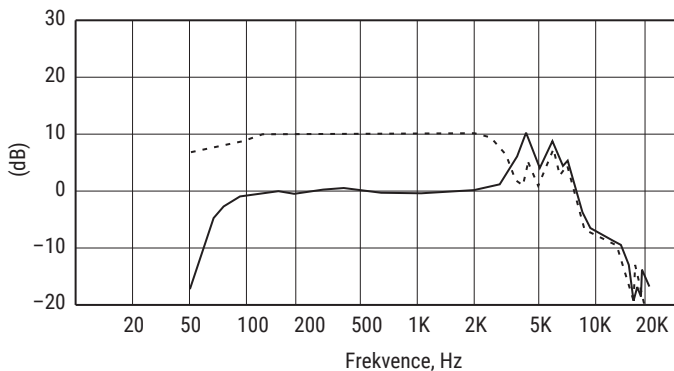


13.6. att. Manekengalva.

Audiofrekvenču mērījumiem ir ieteicams izmantot antropometrisko manekengalvu (13.6. att.). Tai ir mākslīgā auss, kas ticami simulē īsto, bet manekengalva nespēj simulēt galvas elastību. Veicot atkārtotus simulācijas mērījumus, ne vienmēr ir iespējams ausiņas novietot vienā un tajā pašā vietā, tāpēc mērījumu rezultātiem ir jāatrod vidējā vērtība.

Projektējot ausiņas ir nepieciešams atrast optimālo attālumu starp galvu un ausiņām. Šo attālumu noteic ne tikai galvas forma un izmēri, bet arī stīpas piespiedējspēks, ausiņu korpusa konstrukcija un elastīgais ietvars. Grūtāk ir ievērot šos faktorus, konstruējot ārējās ausiņas, kuras piespiežas pa auss ārējo perimetru.

Simulācijas mērījumi parāda, kā mainās frekvenču raksturliktne ārējai ausiņai, mainoties piespiedējspēkam pie auss (13.7. att.). Cēlonis ir zudumi – gaisa noplūde. Secinājums: izstrādājot ausiņas, noplūde ir svarīgs parametrs.



— elektrdinamiskā ārējā ausiņa, normāls stīpas spiediens
 elektrdinamiskā ārējā ausiņa, paaugstināts stīpas spiediens

13.7. att.
 Noplūdes ietekme uz frekvenču raksturliktni.

Tā kā austiņas ir neliela izmēra ierīces un strādā nelielos tilpumos salīdzinājumā ar audio diapazona viļņu garumiem, tad, veicot modelēšanu, var izmantot galīgu elementu (robeželementu) metodi. Tā paver lielas iespējas, izstrādājot austiņas.

13.4. ELEKTRODINAMISKĀS AUSTIŅAS

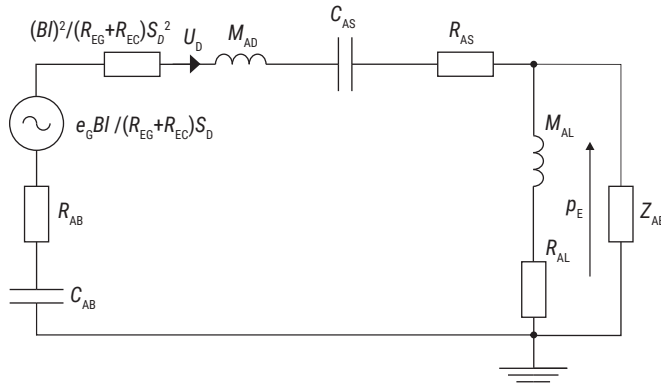
Elektrodinamiskās austiņas ir zemomīgas un tās ir piemērotas dažādām slodzes impedancēm, ļaujot izstrādāt gan aptverošās, gan ārējās austiņas un to modifikācijas.

Ārējās austiņas sasaucas ar slēgta korpusa skandu. Atšķirība ir tikai slodzes impedancē. Austiņām ir neliels skaņas izstarojums. Akustiskās impedances analogijas elektriskais slēgums redzams 13.8. attēlā.

Ir izstrādātas ārējās austiņas, kas funkcionāli līdzīgas skandai ar fāzinvertoriem (13.9. att.).

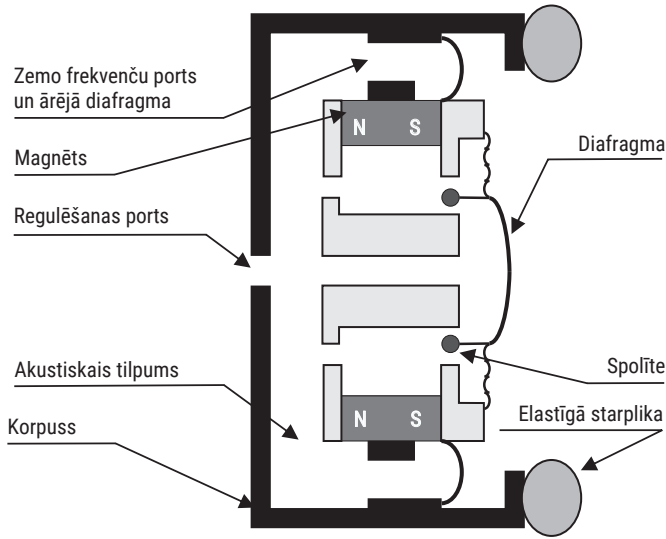
Izveidotie porti un papildu diafragma ļauj paplašināt frekvenču raksturliķni zemo frekvenču daļā.

Ir izveidotas ārējo austiņu konstrukcijas, kurās ir izodinamiskais pārveidotājs – dipols (13.10. att.).



13.8. att. Aptverošās austiņas akustiskās impedances analogija:

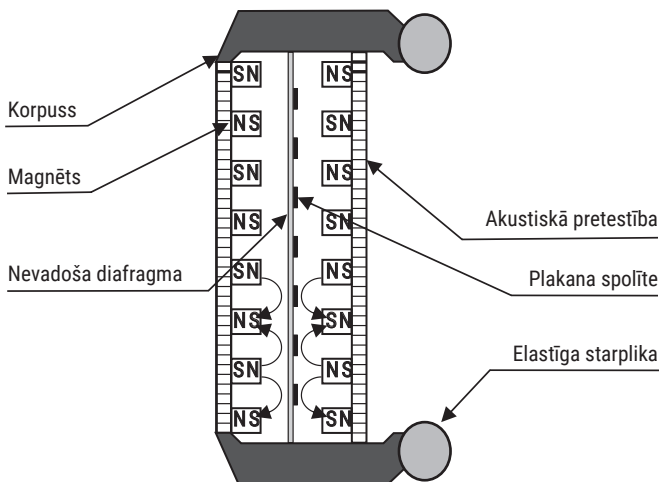
R_{AB} , C_{AB} – aizmugures kameras impedances komponentes; Z_{AE} – starošanas impedance – priekšējās kameras un auss impedance, kapacitatīvs raksturs zem 0,8 kHz; R_{AL} , M_{AL} – noplūde starp galvu un elastīgo starpliku; p_E – skaņas spiediens tilpumā; C_{AC} – impedance tilpumam starp diafragmu un putekļu aizsargsietu; R_{AS} – akustiskā pretestība; M_{AD} – diafragmas akustiskā masa; R_{EG} – ģenerators elektriskā izejas pretestība; R_{EC} – spolītes elektriskā pretestība; S_D – diafragmas efektīvais laukums; e_G – ģenerators (pastiprinātāja) spriegums; $B l$ – magnētiskā lauka indukcijas un spolītes garuma reizinājums.



13.9. att. Austiņas ar paplašinātu frekvenču raksturlīknes zemo frekvenču daļu.

Šajā konstrukcijā diafragma ir uzspriegota, nevadoša folija un uz tās izveidota plakana spolīte. Diafragmai abās pusēs ir novietoti magnēti. Izodinamiskās austiņas ir līdzīgas elektrostatiskajām austiņām, kurās diafragma tiek svārstīta apmēram ar līdzīgu spēku uz laukuma vienību.

Lai austiņu svars būtu pēc iespējas mazāks, pastāvīgo magnētu masa ir maza, līdz ar to vājāks ir statiskais magnētiskais lauks, kas savukārt liek austiņas darbināt ar lielāku strāvu salīdzinājumā ar citas konstrukcijas austiņām.



13.10. att. Izodinamiskās austiņas.

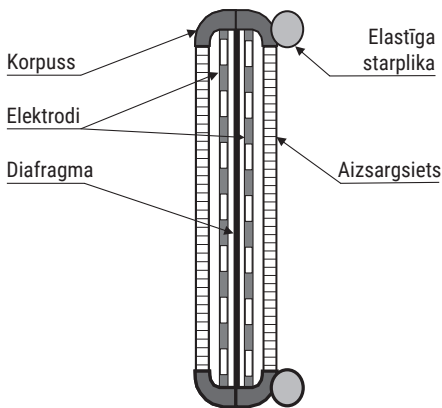
Ieguvums no šādas konstrukcijas austiņām ir nevēlamu rezonanšu klātneesamība. Vienīgais rezonējošais elements ir uzspriegotā diafragma. Tās masa ir niecīga, un rezonanses pīķis tiek vājināts ar starošanas impedanci.

Austiņu evolūcijas laikā ir izstrādātas elektromagnetiskās un arī pjezoelektriskās austiņas.

13.5. ELEKTROSTATISKĀS AUSTIŅAS

Ir zināmi divi konstrukciju tipi:

- klājuma lādiņš tiek izveidots darbības laikā (analogija ar kondensatoru mikrofonu);
- klājuma lādiņš ir uzņemts izgatavošanas procesā (analogija ar elektreta mikrofonu).



13.11. att. Elektrostatiskās austiņas.

Mehāniskā konstrukcija abiem tipiem ir identiska. Tā ir kustīga, uzspriegota diafragma, kas iestiprināta stingrā rāmī un abpus tai akustiski caurspīdīgi elektrodi (13.11. att.).

Pārveidotājs tiek darbināts divtaktu balansētā režīmā, un tam ir lieli nelineārie kropļojumi, kas ierobežo tā lietojumu, ja ir nepieciešams augstas kvalitātes audiosignāls. Nelineāro kropļojumu cēlonis ir meklējams divtaktu pastiprinātāja transformatorā, kas nepieciešams, lai zema līmeņa audiosignālu pārveidotu augstvolatīgā, kurš savukārt nepieciešams dinamiskam elektriskam laukam starp pārveidotāja elektrodiem.



ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅĀM

1. Kas kopējs un kas atšķirīgs austiņām un skaļrunim?
2. Kāds ir austiņu iedalījums pēc konstrukcijas?
3. Kāds ir austiņu iedalījums pēc novietojuma?
4. Kāds ir austiņu iedalījums pēc elektriskā darbības principa?
5. Ko parāda galvas pārvades funkcija?
6. Kāds ir reverberācijas laiks austiņās?

7. Nosauciet aptverošo austiņu lielākās problēmas?
8. Ko ietekmē austiņu piespiedējspēks?
9. Kas uzlabo elektrodinamisko austiņu darbību frekvenču diapazona zemajā galā?
10. Kā ir uzbūvētas elektrostātiskās austiņas?

MOBILO TELEFONU AKUSTIKA



14

- 14.1. Akustiskās sistēmas uzbūve
- 14.2. Akustiskās sistēmas ekvivalentā shēma
- 14.3. Akustiskais zemfrekvences filtrs (helmholca rezonators)



Atmiņas un prāta treniņam

Atsaucoties uz 2019. gada statistikas datiem, ir šāda aptuvena informācija:

- pasaules iedzīvotāju skaits 7,7 miljardi;
- mobilo ierīču skaits 5,2 miljardi;
- viedie telefoni 3,3 miljardi;
- mobilie savienojumi 9,3 miljardi.

Visam šo ierīču klāstam ir jānodrošina ērts remontserviss. Šīm ierīcēm ir jāiekļaujas biznesā un izklaides industrijā, un tam visam ir jābūt kvalitatīvam gan no dizaina, gan ergonomikas, gan akustikas viedokļa.

Akustikas izveidi ierobežo nelielā telpa un ergonomika, taču lietotājs vēlas kvalitatīvu skaņu.

No elektroakustikas skatpunkta mobilajam telefonam (turpmāk telefonam) ir trīs galvenie elementi – akustiskie interfeisi (14.1. att.). Inovatīviem telefoniem ir vairāki mikrofoni, kas kopā ar signālu apstrādes algoritmiem uz apkārtējo trokšņu fona izceļ runātāja balsi:

- mikrofons;
- zvanu skaļrunis;
- brīvroku skaļrunis.



14.1. att. Mobilā telefona elementi.

14.1. AKUSTISKĀS SISTĒMAS UZBŪVE

Telefonā skaļruņi ir iebūvēti, tāpat kā slēgtajā skandā, un ir līdzīgi darbības nosacījumi. Skaņas viļņus telefonā izstaro plakana virsma – diafragma, analogiski kā Hi-Fi skaļruņos. Diafragmu iedarbina spolīte, kas novietota magnētiskajā laukā. Diafragmai un spolītei var būt gan apaļa, gan kvadrātiska forma. Tas attiecināms uz abiem skaļruņiem. Aiz diafragmas ir neliela slēgta telpa, kura raksturojas ar akustisko elastību. Diafragma un spolīte kopā veido akustisko masu. Šo elementu rezonanse noteic izstarotās skaņas zemāko nogriešanas frekvenci.

Brīvroku skaļrunis atskaņo ienākošo zvanu vai muzikālu kompozīciju, ienākošā zvanītāja balsi vai izvēlētu mūziku. Šis skaļrunis ir novietots korpusa galā,

un tas netiek "aizsegts", tāpēc to atskaņošanas režīmā var novietot uz plakanas virsmas, te skaidrojums vārdam *brīvroku*.

Ja virsma ir gana liela, tad skaļums var pieaugt pat divas reizes salīdzinājumā ar turēšanu rokā. Tas tāpēc, ka notiek atstarošana un skaļums pieaug par **+6 dB**.

Kā jebkurā maza izmēra skandā skaļrunim ir optimāli jāstrādā akustiskās saspiešanas virzienā. Diafragmai saspiešanas elastīgums ir neliela daļa no darbības aizmugures tilpuma virzienā.

Aizmugures tilpums ir apmēram **1 cm³**. Šāda konstrukcija ir iespējama, ja diafragmas īpašības ir stabilas un rezonanses frekvence ir nemainīga. Sarunas dalībnieki var komunicēt, ja telefons ir novietots uz virsmas un ieslēgts brīvroku skaļrunis, lai arī blakus tam ir izvietots mikrofons.

Tas iespējams tāpēc, ka ir iebūvēts *atbalss bloķēšanas* režīms, proti, ja skan skaļrunis, mikrofona izejas signāls tiek būtiski vājināts. Telefoniem brīvroku skaļrunis ir gana skaļš, tas var attīstīt pat līdz **105 fonu** līmeni **10 m** attālumā.

Zvanu skaļrunis ir līdzīgs brīvroku skaļrunim. Telpa aiz diafragmas ir lielāka, tajā ir izvietotas elektroniskās komponentes un klaviatūra. No šīs telpas ir lielākas iespējas gaisa noplūdei, un, ja tas notiek, tad zemo frekvenču līmenis samazinās. Savukārt skaļruņa priekšpuse parasti ir piespiesta pie auss, tas mazina frontālo noplūdi.

Mikrofons ir elektreta vai **MEMS** (*Micro-Electro-Mechanical-System*) tipa un tas tiek aktivizēts tikai tad, kad nepieciešama balss pārraide.

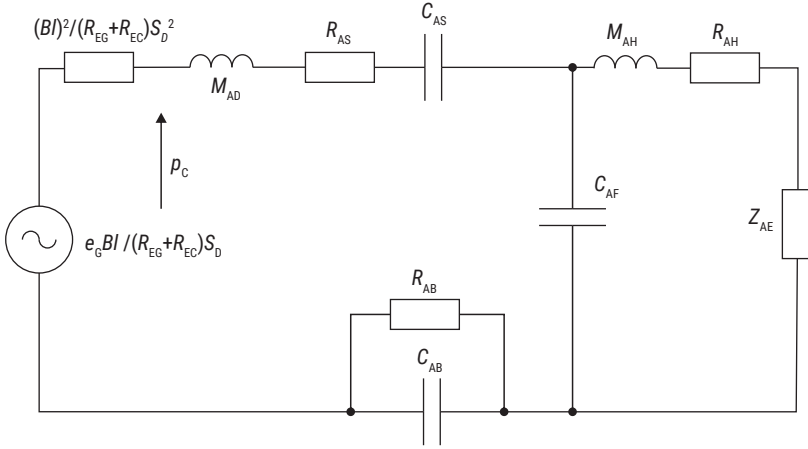
14.2. AKUSTISKĀS SISTĒMAS EKVIVALENTĀ SHĒMA

Telefona skaļruņa ekvivalentā shēma ir redzama 14.2.. att., tās elementi ir aizgūti un savietojami ar slēgtā korpusā ievietota skaļruņa ekvivalentās shēmas elementiem.

Starošanas impedances Z_{AE} lielumu ir sarežģīti noteikt, jo tā mainās atkarībā no tā, kā telefons tiek turēts vai novietots. Lai mazinātu starošanas impedances lieluma maiņu, telefona konstrukcijā ir izveidoti mākslīgi noplūdes kanāli (14.3. att.):

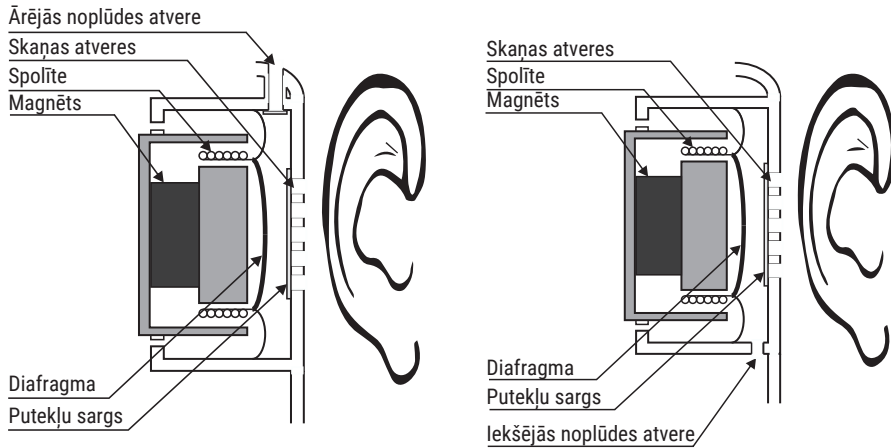
- ārējais;
- iekšējais.

Spiediena noplūde no diafragmas priekšpuses notiek uz ārtelpu vai arī attiecīgi telefona iekšpusē. Lielākoties praksē noplūde tiek veidota uz āru. Protais, noplūde mazina frontālo akustisko spiedienu. Ja noplūdi veido telefona iekšpusē, vājinās zemās frekvences, jo veidojas akustiskais īsslēgums, kaut gan telefona iekšējais tilpums var būt pat līdz **60 cm³**.



14.2. att. Mobilā telefona ekvivalentā shēma akustiskās impedances analogijā:

R_{AB} – akustiskā pretestība ārējai noplūdes atverei; Z_{AE} – starošanas impedances; M_{AH} – skaņas cauruma akustiskā masa; p_c – skaņas spiediens tilpumā; C_{AS} – kopējā saspiešanas elastība; R_{AS} – saspiešanas akustiskā pretestība; M_{AD} – diafragmas un spolītes akustiskā masa; R_{EG} – ģenerators elektriskā izejas pretestība; R_{EC} – spolītes elektriskā pretestība; e_g – ģenerators (pastiprinātāja) spriegums; $B l$ – magnētiskā lauka indukcijas un spolītes garuma reizinājums; C_{AB} – akustiskā elastība diafragmas aizmugurē; C_{AF} – akustiskā elastība tilpuma priekšpusē; R_{AH} – putekļu aizsarga akustiskā pretestība; S_D – diafragmas laukums.



14.3. att. Noplūdes kanāli.

14.3. AKUSTISKAIS ZEMFREKVENCES FILTRS (Helmholca rezonators)

Abiem telefona skaļruņiem priekšējās telpas elastību C_{AF} un skaņas atveres akustisko gaisa masu M_{AH} veido un regulē Helmholca rezonators 14.4. att. Tas ir akustiskais otrās kārtas zemfrekvences filtrs. Tā leņķiskā rezonanses frekvence ir:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{M_{AH} \cdot C_{AF}}. \quad (14.1.)$$

Ja klausāmies mūziku, tad rezonanses frekvence parasti atrodas vēlamā frekvenču diapazona augšējā galā. Filtra labumu Q pie rezonanses noteic putekļu aizsega pretestība R_{AH} .

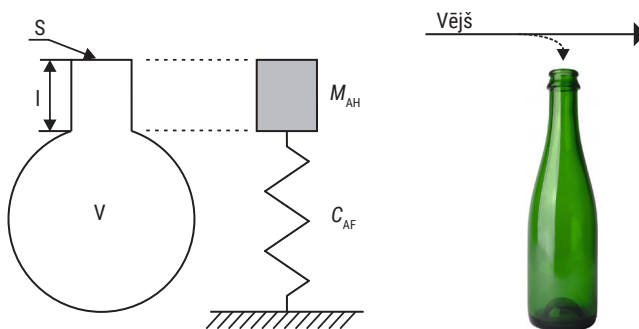
Helmholca rezonatoru akustiskajās sistēmās bieži izmanto kā līdzekli nevēlamu frekvenču ierobežošanai.

Aplūkotais Helmholca rezonators ir lodveida tilpums V ar stingrām sienām, kakls ar garumu l un atveres laukumu S . Analogijas slēgumā tā ir atspere ar elastību $C_{AF} = V$ un masu $M_{AH} = \rho \cdot S \cdot l$ = gaisa masa kaklā. Zinot rezonatora fiziskās dimensijas, ir iespējams noteikt rezonanses frekvenci:

$$f_{rez} = \frac{c}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{V \cdot l}}. \quad (14.2.)$$

Rezonators ir visciešākajā saitē ar mūzikas instrumentiem, piemēram, metāla pūšamajiem, kur, spiežot vārstus, papildus atver dažāda tilpuma rezonanses telpas.

Mājsaimniecībā Helmholca rezonatora prototips ir pudele. Droši vien daudzi ir svilpojuši ar tās palīdzību.



14.4. att. Helmholca rezonators.



ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅAM

1. Nosauciet mobilā telefona trīs akustiskos interfeisus.
2. Kā brīvroku režīmā mainās skaļums, ja telefonu novieto uz plakanas virsmas?
3. Ko nozīmē saīsinājums MEMS?
4. Kāpēc mobilajā telefonā ir iebūvēti noplūdes kanāli?
5. Kur ikdienā varam sastapties ar Helmholca rezonatoru?

KAM DOMĀTAS AUSIS



15

- 15.1. Vēlreiz, kam tās domātas
- 15.2. Dzirdes bojājumi
- 15.3. Cik skaļi ir pārāk skaļi
- 15.4. Dzirdes bojājumu indikatori
- 15.5. Dzirdes aizsardzība
- 15.6. Koncertu apmeklētāju un citu klausītāju dzirdes aizsardzība
- 15.7. Sabiedrības aizsardzība
- 15.8. Pārāk daudz labu lietu



Atmiņas un prāta treniņam

Iepriekšējā nodaļā aplūkojām ausiņas – elektromehāniskos pārveidotājus, kas izstaro skaņu viļņus. Tās vistuvāk no visiem pārveidotājiem atrodas mūsu tik svarīgajam ārējās pasaules informācijas uztvērējam – ausīm. Mūsu ausu uzbūvi un dzirdes mehānismu aplūkojām sākuma nodaļā. Tagad vēlreiz, tikai no dzirdes veselības nodrošināšanas skatupunkta.

15.1. VĒLREIZ, KAM TĀS DOMĀTAS

Ausis ir domātas, lai klausītos, un dažiem laimīgajiem, lai klausītos mūziku, veicot savus tiešos darba pienākumus, un par to vēl saņemtu atalgojumu.

Tas ir īsais skaidrojums. Diemžēl ausu veicamo pienākumu saraksts ir daudz plašāks. Pazūdot dzirdei, cilvēks ne tikai vairs nedzird mūziku, bet arī zaudē kontaktu ar apkārtējiem cilvēkiem.

Ar un caur dzirdi mēs mācāmies, komunicējam, un tā ļauj mūsu paustās idejas uztvert apkārtējiem. Cilvēki ar dzirdes problēmām ir pauduši atziņu, ka dzirde ir viens no svarīgākajiem cilvēka maņu *interfeisiem* un tā kvalitātes mazināšanās jeb zudums ir ļoti liels psiholoģisks trieciens.

Audio, mūzikas industrijas profesionāļiem dzirde ir to galvenais instruments un darbarīks. Rūpes par dzirdi nodrošina iespēju strādāt industrijā arī seniora gados, baudīt mūziku un dzirdēt savus mazbērnus.

15.2. DZIRDES BOJĀJUMI

Sākumā vienosimies par terminoloģiju un izpratni. Kā jau sākumnodaļā aplūkojām, skaņas ceļš pie mums sākas no ārējās auss. Skaņas viļņi turpina tālāko ceļu, tie tiek apstrādāti, pārveidoti, tālāk sūtīti, un visbeidzot smadzenēs saņemtie signāli veido to, ko saucam par dzirdi. Priekšlikums visu garo skaņas ceļu ietvert vārdā *auss* un to arī turpmākajā izklāsta iespējamajās vietās izmantot.

Dzirdes zudumi ir plaši izplatīti, bet novēršama trauma. Pasaulē ir desmitiem miljonu cilvēku, kuru dzirdes pasliktinājuma jeb zuduma cēlonis ir troksnis. Dzirdi var vienkārši un ātri traumēt, un cilvēks kļūst daļēji vai pilnīgi nedzirdīgs vai arī viņam galvā sākas nerimtīga zvanišana – *tinīts*. Dzirdes zudums nenozīmē absolūtu klusumu. Tā var būt minētā zvanišana, šalkšana vai kāda cita netīkama izpausmes forma. Tikpat labi dzirdes zudumi var izpausies kā klusu skaņu nedzirdēšana pie atsevišķām frekvencēm, dzirdes sliekšņa paaugstināšanās, ejot pa frekvenču raksturlīkni augsto toņu virzienā. Tas viss var progresēt, ja dzirdes pasliktināšanās turpinās.

Dzirdes sliekšņa nobīde var būt uz kādu laiku (*Temporary Threshold Shift – TTS*) vai arī pastāvīga (*Permanent Threshold Shift – PTS*). Biežāk šīs netīkamās izmaiņas ir novērojamas augsto frekvenču apgabalā – no **3000 Hz** līdz **6000 Hz**

ar selektīvu, būtisku vājinājumu ap **4000 Hz**. Visbiežāk dzirdes zudumu cēloņi ir divi:

- ļoti skaļš, īss vienreizējs trokšņa impulss;
- skaļš, ilgstošs troksnis.

Ilustrācijas no ikdienas – tas varētu būt tuva šāviena troksnis un darbs trokšņainā vidē vai skaļas mūzikas koncerta norises vieta. Dzirdi var traumēt arī medikamenti, narkotikas un ķīmiskas vielas. Troksnis un stress ir cieši saistīti, to apliecina veiktie pētījumi. Troksnis var traumēt ne tikai dzirdi. Trokšņaina darbvieta var ietekmēt arī sirdsdarbību.

15.3. CIK SKAĻI IR PĀRĀK SKAĻI

Vispasaules globalizācijas tendenču iespaidā turpmākajā izklāstā būs vairākas atsauces uz Amerikas Savienoto Valstu normatīvo dokumentāciju.

Tāpat kā jebkurā industrijas nozarē arī skaņu industrijā ir normatīvā dokumentācija, kura tur rūpi par industrijas darbinieku veselību. Darbvieta trokšņu līmeni un ilgumu regulē (*Occupational Safety and Health Administration – OSHA*) dokumenta prasības. Pieļaujamie trokšņu līmeņi un pieļaujamais iedarbības ilgums doti 15.1. tabulā.

Trokšņu līmeni var mērīt ar skaņas līmeņa mērītāju vai arī ar dozimetru, kas ir katram darbiniekam un kas automātiski noteic vidējo trokšņu līmeni. Praksē trokšņu līmenis bieži vien tiek noteikts kā dienas deva. Piemēram, darbinieks, kas strādā vidē ar vidējo trokšņu līmeni **90 dBA**, četru stundu laikā saņem **50 %** lielu devu no pieļaujamās normas.

Dzirdes aizsardzība nav vienīga metode, kā rūpēties par dzirdes veselību. *OSHA* prasības noteic, ka darbiniekiem, kas astoņu stundu laikā vidēji ir pakļauti **85 dB** trokšņu līmeņa iedarbībai, ir jābūt pieejamai monitoringa programmai,

15.1. tabula

Ilgums: stundas/dienā	Skaņas līmenis (dBA) lēni mainīgs
8	90
6	92
4	95
3	97
2	100
1,5	102
1	105
0,5	110
<0,25	115

kuras ietvarā reizi gadā tiek testēta dzirde. Šim ir jābūt bezmaksas pasākumam. Tāpat *OSHA* regulējums noteic to, ka darba devējam ir jānodrošina arī citi dzirdes aizsardzības līdzekļi un jāveic atbilstoši mērījumi, lai aizsargātu darbinieku dzirdi. *OSHA* prasību ievērošana un to praktiskā izpilde nav stingri izmērāms lielums, bieži vien tas viss transformējas par prasībām attiecībā pret darbinieku. Ir pilnīgi iespējams, ka darbinieks neko nezina par darba devēja apmaksātu dzirdes testu un dzirdes aizsardzības programmu.

Nākas atzīt, ka *OSHA* prasības nav pašas stingrākās attiecībā uz dzirdes aizsardzību, starp citu, valstu nacionālajām dzirdes aizsardzības programmām. Jau vairāk nekā gadsimta trešdaļu gan zinātnieki, gan *OSHA* izstrādātāji zina, ka aptuveni ceturtdaļa populācijas dzīves laikā ir pakļauti *OSHA* atļautajiem trokšņu līmeņiem un ir guvuši ievērojamus dzirdes zudumus.

Citas dzirdes veselības pētniecības un aizsardzības organizācijas ieteic pazemināt vidējo pieļaujamo trokšņu līmeni **8** stundu laikā. Nacionālais darba drošības un veselības institūts (*National Institute of Occupation Safety and Health – NIOSH*) rekomendē **85 dBA**, pētījumi liecina, ka dzirdes zudumu līmenis procentuāli samazinās.

Pasaules veselības organizācija (*World Health Organization – WHO*) šo līmeni ieteic samazināt līdz pat **75 dBA**. Jāatgādina, ka ilgstošo trokšņu kaitīgā iedarbība veidojas kā summa un, ja darbinieks pēc **8** stundu garas darbdienas dodas mājup un atkal atrodas toksīnainā vidē (pļauj mauriņu bez austiņām-klusinātājiem), tad traumatiskā iedarbība turpinās. *WHO* rekomendē rokconcerta skaļumu baudīt ne vairāk kā četras reizes gadā.

15.4. DZIRDĒS BOJĀJUMU INDIKATORI

Tādi ir vairāki. Dzirde var pasliktināties pakāpeniski un lēni, un tas var notikt arī strauji progresējot. Vissvarīgākie dzirdes pasliktinājuma rādītāji ir tie, kurus var identificēt pirms dzirdes bojājuma rašanās. Pirmais un redzamākais rādītājs ir Vides aizsardzības aģentūras (*Environmental Protection Agency – EPA*) un *WHO* noteikto pieļaujamo trokšņu līmeņu pārsniegšana. Pēc **8** stundu ilgas trokšņu iedarbības dzirdes bojājumu risks pieaug. Pārsniedzot drošos līmeņus, piemēram, ja darbs notiek vidē pēc *OSHA* rekomendācijām, kāds var gūt ievērojamus dzirdes zudumus, kāds nē, bet ikvienam dzirde būs traumēta.

Problēma ir faktā, ka nav zināms, kā viennozīmīgi noteikt, vai jūs esat tā populācijas **1/4** vai **1/3**, kas cietīs būtiskus dzirdes zudumus pie **90 dB**, vai arī jūs esat starp tām **2/3** vai **3/4** populācijas, kas cietīs mazāk. Tas viss noved pie tā, ka ir jau par vēlu un ir radušies bojājumi. Nav šaubu, ka, būtiski pārsniedzot *OSHA* noteiktos sliekšņus, dzirde tiek būtiski traumēta.

Ir divas dzirdes bojājumu indikācijas, kas signalizē par to, ka dzirde var pasliktināties, ja trokšņu iedarbība turpinās.

Pirmā ir troksnis ausīs ar īslaicīgu zvanīšanu, kas ir sekas no skaļas vai ilgstošas trokšņa iedarbības. Darbs vai darba vide, kas izsauc troksni ausīs, viennozīmīgi ir par skaļu, tāpēc nekavējoties jāveic pasākumi, lai ierobežotu kaitējumu.

Otrā indikācija ir dzirdes sliekšņa nobīde **TTS**. Tas signalizē par to, ka var iestāties būtiski dzirdes bojājumi, ja nevēlamā trokšņu iedarbība turpināsies. Dzirdes sliekšnis ir klusākā skaņa, kas tiek saklausīta pie dažādām frekvencēm. Dzirdes testu frekvenču diapazons ar medicīnisku ievirzi ir no **250 Hz** līdz **8000 Hz**. Šī testa veikšanai ir nepieciešama atbilstoša aparatūra.

Tīri subjektīvi par to, ka dzirdes sliekšnis ir mainījies, var spriest pēc tā, ka klausoties kādu savu iecienīto skaņuplati, jūs konstatējat, ka ir pazudis kāds instruments vai mainījies skaņdarba aranžējums.

Svarīgi ir atcerēties, ka abas indikācijas vēl nenozīmē, ka cietīsiet dzirdes būtisku zudumu, taču tās liecina par to, ka trokšņa iedarbe ir pārāk liela. Regulāri dzirdes testi parādīs dzirdes izmaiņas, pirms tās būs kļuvušas neatgriezeniskas. Darba devējam ir jānodrošina regulāri dzirdes testi darbiniekiem, kuru darbvieta ir ar augstu trokšņu līmeni.

Par to, ka ir parādījušies nopietni dzirdes bojājumi, liecina tīri sadzīviskas situācijas, piemēram, kādā skaļā, cilvēku piepildītā vietā, kaut vai restorānā, ir grūti saprast citu teikto un jūs bieži pārjautājat citu teikto. Bieži pats jautātājs to vēl neapjauš, bet to ievēro apkārtējie. Lai gan dzirdes bojājumus nav iespējams novērst, dzirdes zudumu var mazināt, izmantojot dzirdes aparātus.

Skarbi, tomēr der atcerēties, ja jums ir bojāta dzirde, tas vēl nenozīmē, ka jūs to nevarat padarīt vēl sliktāku.

15.5. DZIRDES AIZSARDZĪBA

Sargāt dzirdi ir gaužām vienkārši: izvairieties no ilgstošas skaļu skaņu iedarbības. Vai nu samaziniet skaņas avota skaļumu, vai arī veiciet pasākumus, kuri samazina avota izdalītās enerģijas daudzumu, kas piekļūst jūsu ausīm. Tik vienkārši. Ir vairākas paradigmas, kā to veikt, ja jūs uzskatāt vai arī esat noteicis mērijot, ka trokšņa līmenis pārsniedz pieļaujamo līmeni. Jūs varat samazināt trokšņu līmeni vai arī to iedarbības laiku, vai arī veikt abus pasākumus vienlaikus. 15.2. tabulā apkopotas dažādu organizāciju rekomendācijas.

Tabulā ietvertās rekomendācijas noteic visu trokšņu summu dienas garumā. Kā jau iepriekš tika norādīts, ja jūs pēc trokšņaina darblaika dodaties uz vidi, kur atkal ir trokšņi, tad viss summējas. Ir vēlams pēc iespējas minimizēt

15.2. tabula

dBA	EPA un WHO			NIOSH			OSHA	
	stundas	minūtes	sekundes	stundas	minūtes	sekundes	stundas	minūtes
101								
102			56					
103					7	30		
104								
105			28				1	60
106					3	45		
107								
108			14					
109					1	53		
110							0,5	30
111			7					
112						56		
113								
114			4					
115						28	0,25	15

trokšņa iedarbības laiku, bet ne vienmēr tas ir iespējams. Tad jāveic citi pasākumi, kas ļautu samazināt trokšņa līmeni jūsu ausīs:

- jāizmanto klusāki instrumenti un iekārtas;
- jāuzturas pēc iespējas tālāk no trokšņa avota;
- jāizmanto trokšņa barjeras vai troksni absorbējoši materiāli;
- jālieto ausu aizbāžņi;
- jālieto troksni slāpējošas pasīvās vai aktīvās austiņas.

Bieži tiek iebilsts pret ausu aizbāžņu vai austiņu lietošanu, norādot, ka tās izmaina skaņu un aprūtinā savstarpējo komunikāciju. Te nu ir jāizvēlās, ko īsti gribam.

Cilvēku runas diapazons ir apmēram no **500 Hz** līdz **4000 Hz**. Patskaņi izvietojas zemāko frekvenču galā, savukārt līdzskaņi augstāko frekvenču apgabalā. Sargājot dzirdi, ir svarīgi samazināt trokšņu līmeni augstāko frekvenču apgabalā, kas, protams, rada savstarpējās komunikācijas problēmas, jo šeit ir līdzskaņi.

Ir iespējams iegādāties trokšņus mazinošas ierīces, kuras ienes vājinājumu vienmērīgi visā frekvenču apgabalā. Šajās ierīcēs frekvenču savstarpējās attiecības nemainās visā diapazonā, tikai pazeminās kopējais skaļuma līmenis. Šīs ierīces ir paredzētas mūzikas industrijas darbiniekiem un, protams, tās ir dārgākas salīdzinājumā ar plašpatēriņa ierīcēm.

15.6. KONCERTU APMEKLĒTĀJU UN CITU KLAUSĪTĀJU DZIRDES AIZSARDZĪBA

Ausis ir, lai klausītos un dzirdētu, un mūzikas koncerta laikā to ir ļoti daudz klātienē. Gan klausītāji, gan mūziķi ir pakļauti dzirdes traumēšanas riskam. Skaļa mūzika ir aizraujoša – tāda ir skaļuma psiholoģija. Tā ir adrenalīna deva. Smadzenēs pieaug neironu plūsma, un mēs paši rezonējam līdzī zemajām frekvencēm.

Mūzikas skaļums ir pieaudzis līdz ar cilvēces attīstību. Pirmsākumā pērkons bija visskaļākais. Dzirde bija un ir svarīga maņa cilvēka dzīvē. Tā informē par izmaiņām apkārtējā vidē. Troksnis brīdināja pirmatnējo cilvēku par draudošām briesmām un ļāva no tām izvairīties un izdzīvot. Troksnis ir svarīgs trauksmes signāls, kad bērns raud vai kliez.

Atskatoties cilvēces vēsturē, var secināt – ja ir troksnis, briesmas tuvojas vai jau ir klāt. No psiholoģijas viedokļa vērtējot, jāsecina, ka skaļš troksnis mudina mūs cīnīties vai bēgt. Mūsdienās skaļš troksnis lielākoties nav mudinājums cīnīties vai bēgt, tā ir adrenalīna deva. Tas ir cēlonis skaļai kinofilmu mūzikai, skaļām sporta zālēm un skaļai koncertmūzikai. Tas viss palielina azartu un enerģiju un diemžēl veic arī nevēlamas lietas – palielina stresa līmeni.

Būvaukustikas normatīvajā dokumentācijā ir sniegtas rekomendācijas, kā mazināt troksni sabiedriskās telpās.

15.7. SABIEDRĪBAS AIZSARDZĪBA

Troksnis ir kopā ar sabiedrību un vidi ap to. Vārdam *troksnis* ir divas atšķirīgas nozīmes. Ja runājam par dzirdes zudumiem, tad ar vārdu troksnis saprotam ļoti skaļu skaņu, kas var izraisīt dzirdes bojājumus un zudumu.

Savukārt saistībā ar sabiedrību troksnis ir fonētikas nesējs. Tas veido skaņas ainavu. Troksnis ieplūst sabiedrībā, un arī sabiedrība rada to. Kad troksnis sasniedz sabiedrības dzirdi, tam ir vājināts spektra augstāko frekvenču apgabals. To ir veikušas ēkas, dažādas barjeras un arī atmosfēra. Situāciju nedaudz vienkāršoti var raksturot ar mūzikas industrijas terminoloģijas palīdzību – *paliel pāri tikai basi*.

Trokšņu problēmas sabiedrībā var palīdzēt risināt akustikas speciālisti arhitektūrā un būvniecībā. Ja sabiedriskās vietās ir nepieciešama apskaņošana, tad rekomendēta ir izkļiedēta skaņu sistēma, nevis jaudīgs skandu bloks. Trokšņu nevēlamo darbību var ierobežot ar skaņas barjerām, bet ne vienmēr un visās vides vietās. To darbības efektivitāte ir tendēta uz tuvākajiem kaimiņiem.

Būvju iekšējo sienu skaņas caurlaidības lielumam ir vēlams būt mazam. Trokšņa zemo frekvenču problēma ir grūtāk risināma sabiedrības kontekstā,

tās risinot, der ieklausīties profesionāļu ieteikumos. Logi un durvis ir problemātiski būvelementi, jo tie vājina skaņas izolāciju, pat aizvērtā stāvoklī. Skaņas absorbcija vājina pārvadi caur sienām.

Būves jāveido tā, lai atsaistītu iekšsienas no ārsienām, proti, iekšsienu ietvertajām vibrācijām nevajadzētu izraisīt ārsienu rezonansi un palielināt trokšņu līmeni sabiedrībā. Ir daudz un dažādu materiālu un būvniecības paņēmieni, lai to sasniegtu. Ja nepalīdz arhitekti un būvnieki, tad vajag optimizēt kopējo skaņas spiediena līmeni, it īpaši zemo frekvenču līmeni.

15.8. PĀRĀK DAUDZ LABU LIETU

Mūsdienās troksnis ir viens no nopietnākajiem vides un sabiedrības piesārņotājiem. Vārds „troksnis” (*angļu val. noise*) ir cēlies no seno romiešu vārda *nausea*, tas liek domāt, ka arī viņiem, iespējams, ir bijušas problēmas ar troksni.

Daudzi no trokšņiem ir pašas sabiedrības radīti – zāles plāvēji, pneimatiskie atskaldāmie āmuri, auto maģistrāles, sabiedriskais un privātais transports u.c.

Mēs esam atvēruši skaņas Pandoras lādīti, kura ietekmē ne tikai mūsu dzirdi, bet arī vispārīgo veselības stāvokli. Personālās audioiekārtas un sistēmas, piemēram, **MP3** atskaņotāji, auto stereo sistēmas, mājas kinozāle, ir tas, ko mēs varam ietekmēt – regulēt. Savukārt koncertzāles, klubi, lekciju auditorijas, stadioni, industrija ir daļa no tām neskaitāmajām draudu vietām mūsu dzirdes veselībai, kuras nav pakļautas mūsu ietekmei. No nelieliem traucējumiem līdz pat nopietniem veselības riskiem, tāda ir šo avotu ietekme gan uz dalībniekiem, gan uz personālu, gan uz tuvākajiem kaimiņiem.

Kā jau iepriekš apskatījām, **105 dBA** liels troksnis stundas garumā, vai pat mazāk, spēj izraisīt nopietnus un ilgstošus dzirdes traucējumus. Veiktie pētījumi liecina, ka smēķēšana, visu veidu narkotikas, sliktis vispārējās veselības stāvoklis kopā ar neadekvāti lielu troksni tikai veicina dzirdes pasliktināšanos.

Augsts skaņas līmenis ir tikai daļa no problēmas. Skaņa izplatās, ignorējot nekustāmā īpašuma robežas, tādējādi ietekmējot gan kaimiņus, gan tuvāko apkārtni. Pētījumi apliecina augsta trokšņu līmeņa kaitīgo ietekmi uz miegu un sidsdarbību.

Sabiedrība visā pasaulē ir izstrādājusi daudz un dažāda veida dokumentus, kas regulē trokšņu kaitniecisko iedarbību uz cilvēka dzirdi. Vieni aplūko troksni kā dzirdes kairinātāju ar noteiktu pieļaujamo līmeni, citi noteic pieļaujamo summāro skaņas spiediena līmeni dienā, nedēļā. Diemžēl troksnis un skaņa ir mainīgs un parejošs lielums. Līdz ar to ir sarežģīti veikt kontroli un regulēšanu. Pasaulē ir gana daudz iekārtu un sistēmu, kas veic trokšņu monitoringu. Tie ir aparatūras un programmatūras kompleksi.



ATMIŅAS UN PRĀTA TREIŅAM

1. Kam cilvēkam ir domātas ausis?
2. Kam dzirde ir darba instruments?
3. Kas ir dzirdes sliekšnis?
4. Nosauciet dzirdes bojājumu izpausmes formas.
5. Kādi ir visbiežāk sastopamie dzirdes bojājuma un zuduma cēloņi?
6. Ar ko var mērīt trokšņu līmeni?
7. Kas ir svarīgākie parametri, kurus regulē normatīvā dokumentācija visā pasaulē?
8. Vai trokšņiem ir kumulatīva daba?
9. Kādas ir dzirdes bojājumu indikācijas?
10. Kā mainās dzirde, cilvēkam dabiski novecojot?
11. Kā aizsargāt dzirdi?
12. Vai troksnis vienmēr ir nosodāms?
13. Kā mazināt trokšņu nevēlamo iedarbību sabiedrībā?
14. Nosauciet trokšņu avotus sabiedrībā?
15. Ko nozīmē uzraksts 84 dB uz zāles plāvēja?

IZMANTOTĀ UN IETEICAMĀ LITERATŪRA

1. Tomariņš K. *Radio Elektroakustika*. Rīga: Zvaigzne, 1978. 246 lpp.
2. Попов В. И. *Основы музыкальной акустики*. Рига: РТУ, 2010. 428 с.
3. Попов В. И. *Певец и компьютер*. Рига: РТУ, 2006. 100 с.
4. Beranek L. L. and Mellow T. J. *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. Academic Press is an imprint Elsevier, MA USA, 2012, ISBN: 978-0-12-391421-7. 704 p.
5. Everest F. A. and Pohlmann K. C. *Master Handbook of Acoustics sixth edition*. Mc Graw Hill Education, USA, 2015, ISBN: 978-0-07-184104-7. 622 p.
6. Thompson D. M. *Understanding Audio*. Berklee Press, MA USA, 2005, ISBN: 978-0-634-00959-4. 360 p.
7. Ballou G. A. *Sound Engineer's Guide to Audio Tests and Measurement*. Focal Press, UK, 2010, ISBN: 978-0-240-81265-6. 180 p.
8. Kleiner M. *Electroacoustics*. CRC Press, FL USA, 2013, ISBN: 978-1-4398-3618-7. 596 p.
9. Huber D. M. *The Midi Manual*. – 3rd ed. – Focal Press, MA USA, 2007, ISBN 13: 978-0-240-80798-0. 362 p.
10. Davis G., Jones R. *The Sound Reinforcement Handbook*. – 2nd ed. – CA USA, 1989, ISBN: 0-88188-900-8. 418 p.
11. Truax B. *Acoustic Communication*. – 2nd ed. – Ablex Publishing, London UK, 2001, ISBN: 1-56750-537-6. 284 p.
12. Rumreich M. *Car Stereo Cookbook*. – 2nd ed. – McGraw-Hill, NY USA, 2005, ISBN: 0-07-144847-0. 358 p.
13. Veit I. *Technische Akustik*. Vogel Buchverlag Wurzburg, Germany, 1988, ISBN: 3-8023-0063-7, 172 seite.
14. Иофе В. К., Корольков В. Г., Сапожков М. А. *Справочник по акустике*. Москва: Связь, 1979. 312 с.
15. Randall R. B. *Frequency Analysis*. – 3rd ed. – Bruel & Kjaer, Denmark, 1987, ISBN: 87-87355-07-8. 344 p.
16. Burduns G. Rokasgrāmata par starptautisko mērvienību sistēmu. Rīga: Avots, 1982. 217 lpp.

Izklāstītā informācija nav visaptveroša, tāpēc plašāku un dziļāku zināšanu gūšanai tiek rekomendēta papildu literatūra:

17. Olson H. F. *Acoustical Engineering*. – 3rd ed. – D. van Nostrand, Princeton, NJ, 1957, Library of Congress Catalogue Card No. 57-8143.
18. Beranek L. L. *Acoustics*. American Institute of Physics, New York, 1986, ISBN-13: 978-0083184943.
19. Hunt, F. V. *Electroacoustics*. American Institute of Physics, New York, 1982, ISBN-13: 978-0883184011.
20. Merhaut, J. *Theory of Electroacoustics*. McGraw-Hill, New York, 1979, ISBN-13: 978-0070414785.

21. Rossi, M. *Acoustics and Electroacoustics*. Artech House, Norwood, MA, 1988, ISBN-13: 978-0890062555.
22. Geddes, E. *Audio Transducers*. Gedlee, MI, 2002, ISBN-13: 978-0972208505.
23. Gayford, M. L. *Electroacoustics*. Newnes Butterworth, London, U.K., 1970, ISBN-13: 978-0408000260.
24. Kinsler, L. E. et al. *Fundamentals of Acoustics*. – 2nd edn. – John Wiley & Sons, New York, 1962, ASIN: B000LC9D06.
25. Skudrzyk, E. *Simple and Complex Vibration Systems*. Pennsylvania State University Press, University Park, 1968, ISBN-13: 978-02717312278.
26. Geklshøj, B. *Electromechanical and electroacoustical analogies*. PhD thesis, Academy of Technical Sciences, Kobenhavn, 1947.
27. Olson, H. F. *Solution of Engineering Problems by Dynamical Analogies* – 2nd edn. – D. van Nostrand, Princeton, NJ, 1966, ASIN: B000NLS85K.
28. Fischer F. A. *Fundamentals of Electroacoustics*. – 1st English edn. – Interscience Publishers, Inc., New York, 1955, ASIN: B000CJA9N.
29. Marshall Leach, W. *Introduction to Electroacoustics and Audio Amplifier Design*. – 3rd edn. – Kendall Hunt Publishing, Dubuque, IA, 2008, ISBN-13: 978-0757503757.
30. Borwick, J. *Loudspeaker and Headphone Handbook*. – 3rd edn. – Focal Press, Oxford, U.K., 2001, ISBN-13: 978-0240515786.
31. Colloms, M. *High Performance Loudspeakers*. Wiley, New York (2005) ISBN-13: 978-0470094303.
32. Blair Benson, K. *Audio Engineering Handbook*. McGraw-Hill, New York, 1988, ISBN-13:978-0070047778.
33. Lindsay, R. B. *The Story of Acoustics*. J. Acoust. Soc. Am., 39, 629-644, 1966.