

LATVIJAS UNIVERSITĀTE

FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE

FIZIKAS NODAĻA

EKSPERIMENTĀLĀS FIZIKAS KATEDRA

VALDIS VĪTOLIŅŠ

VIENMĒRĪGĀS TEMPERĀCIJAS PROBLĒMAS

BAKALAURA DARBS

Darba vadītājs:
doc. Vilnis Detlovs

RĪGA 1994

Anotācija

Bakalaura darbs satur 40 lapas teksta datumsalikumā, tajā ir 20 attēli un 7 tabulas. Darbs uzrakstīts latviešu valodā.

Darbā apskatīta viena no nozīmīgākajām problēmām muzikālajā akustikā. Tajā aplūkotas vienmērīgi temperētās gammās labās un sliktās īpašības, fizikālie modeļi, kas to apraksta, un to pielietojuma robežas. Darba galvenais mērķis ir aplūkot un sistematizēt šajā jomā iegūtās zināšanas, un atrast saikni starp līdzīgu problēmu dažādiem risinājumiem.

Visumā darbam ir pārskata raksturs, taču kā darba daļa, tajā ir veikti pētījumi, kurā praktiski noteikta skaņu sintezatora "Yamaha PSR-36" gammās precizitāte. Šī reālā gamma salīdzināta ar teorētisko gammu un izdarīta iegūto rezultātu analīze.

Annotation

The Bachelor's paper contains 40 pages of computer - composed text, there are including 20 figures and 7 tables. The paper is written in Latvian.

The paper deals with one of most important problems in the musical acoustics. The equally tempered scale, its positive and negative qualities, the physical models, used to describe, as well as the limits of application of these models are examined. The object of the paper is to look over and systematize already optimized knowledge practice in this field, and find the link between different solution of resembling problems.

As one part of work, the research in which the precision of the scale of the synthesizer "Yamaha PSR - 36" is practically determined the obtained results are analyzed and compared with the theoretical scale.

Saturs

Anotācija	2
Annotation	3
Saturs	4
Ievads	5
Vēsturiskais apskats	
Mūsdienu temperētās gammas izveidošanās	6
1.Nodaļa	
Temperētās gammas matemātiskais modelis, tā pielietojums elektroniskajos instrumentos	14
2.Nodaļa	
2.1.Vienmērīgi temperētās gammas iegūšana ar t.s. sitienu metodi	22
2.2.Gammas iegūšana, ja skaņas avoti nav harmoniski	25
3.Nodaļa Cilvēka dzirdes izsauktās korekcijas	
3.1.Īss cilvēka dzirdes aparāta apraksts	31
3.2.Novirzes no teorētiskās vienmērīgi temperētās gammas, saskaņā ar cilvēka psihofizioloģiskajām prasībām	34
Nobeigums	38
Literatūras saraksts	39

Ievads

Ar akustiku sastopas ikviens no mums. Praktiski jebkura dabas parādība, jebkāds darbs vai process, tiek pavadīts ar skaņu. Ar skaņu mūsdienās saprot mehāniskas svārstības kādā elastīgā vidē. Zinātni, kas šīs svārstības pēta, sauc par akustiku.

Zinātni, kas pēta mākslā lietojamo svārstību veidošanos un izplatīšanos, sakarības starp tām, to ietekmi uz cilvēku un otrādi, sauc par muzikālo akustiku. Mēdz teikt, ka muzikālā akustika ir zinātne, kas pēta muzikālās skaņas, un muzikālās skaņas ir skaņas, kuras pēta muzikālā akustika. Vairāk nepaskaidrojot mūzikālās akustikas jēdzienu, pāriesim pie tēmas, kuru iztirzāsim visā turpmākajā darbā.

Darbā tiek aplūkota viena no mūzikālās akustikas jomām - skaņas augstuma (frekvences) sakarību pētīšana mūzikā izmantojamo skaņu kopumā. Mūzikā izmantojamo skaņu kopumu sauc par gammu. Darbā netiek aplūktas visas mūzikā sastopamās gammas (tas ir pārāk plašs uzdevums), bet tikai t.s. vienmērīgi temperētā gamma, ko mūsdienās izmanto visplašāk.

Vispirms hronoloģiskā secībā tiek aplūkots, kā vispār ir veidojušās gammas (tātad skaņu kopumi), parādīts, kā izveidojās un nostiprinājās vienmērīgi temperētā gamma.

Tālāk loģiskā secībā no vienkāršākā uz sarežģītāko, tiek aplūkoti vienmērīgi temperētās gammas matemātiskie un fizikālie modeļi, un to pielietojums. Parādīts, kā arvien precīzākos pētījumos parādās arvien jauni efekti, kas rada novirzes no matemātiski visvienkāršākā gammas modeļa, un parādīts, kā tie kļūst arvien kvalitatīvāki un sarežģītāki.

Beigās tiek parādīts, ka vienmērīgi temperētā gamma, kas mūsdienās kautkāda veidā tiek izmantota praktiski visas pasaules mūzikā, savā visvienkāršākajā, matemātiskajam modelim atbilstošajā variantā (kuru parasti arī sauc par vienmērīgi temperēto gammu), praktiski nekur netiek izmantota, jo dažādu iemeslu, efektu un apstākļu dēļ, novirzes no tās ir tik ievērojamas, ka tās noteikti nevar neņemt vērā.

Vēsturiskais apskats Mūsdienu temperētās gammas izveidošanās

Kā uzskata daži autori [1,20.lpp.], pirmās zināšanas mūzikā cilvēkiem radušās jau pirms 20 - 25 gadu tūkstošiem. Vispirms tās radās sitamo instrumentu jomā [1,20.lpp.] un ar tiem pirmatnējais cilvēks - kromanjonietis - izdarīja savus pirmos atklājumus akustikā. Viens atklājums bija skaņas augstuma ievērošana, otrs - visdziļākais - atšķirīgu tembru un skaņas virstoņu atklāšana.

Kā to parāda dažādu arheoloģisko izrakumu izpēte, skaņas augstumu kromanjonieši "ieregulēja" jau sitamajiem instrumentiem. Piemēram, mūsdienu roka ansambļu basbungas prototips, kā izrādās, bijis speciāli apstrādāts mamuta galvaskauss [1,41.lpp.]. Tāpat kromanjonieši centās uzlabot arī skaņas tembru (kā tas noteikts analizējot sitamo instrumentu izskatu), bet to, ka tas atkarīgs no skaņas virstoņu daudzuma, viņi atklāja tikai ar agrākajiem pūšamajiem instrumentiem.

Pirmie pūšamie instrumenti bija flautas (stabules). Visvecākā arheoloģiskajos izrakumos atrastā flauta tiek datēta ar apmēram 18000 g.p.m.ē. [1,46.lpp.]. Šīs flautas dublikāta akustiskā analīze palīdzēja diezgan precīzi restaurēt tā laika cilvēku zināšanas akustikā.

Spēlējot ar šādu flautu un izmainot pirkstu stāvokli uz caurumiņiem, flautā var iesvārstīt arvien īsākus gaisa stabus (skaitā 1,2,3, utt.), un iegūt t.s. dabīgo gammu, kas faktiski ataino flautas pamattoni (svārstās viens gaisa stabs) ar tā augstākajiem virstoņiem (to frekvence ir tikpat reižu lielāka, cik reizes gaisa stabs flautā īsāks). Līdz ar to var apgalvot, ka tajā laikā cilvēkiem jau bija zināma virstoņu vienkāršākā fizikālā jēga, proti, ka tās ir skaņas, ko veido svārstoši gaisa stabi, kas ievietojas stabulē tieši vienu, divas, trīs, utt. reizes [1,77 lpp.].

Iegūto t.s. dabīgo gammu (skaņu kopums, ko veido pamattonis ar tā virstoņiem [2,44 lpp.]) tabulā var attēlot šādi:

1.tabula. Dabīgā gamma, ko var iegūt ar kādu pūšamo instrumentu:

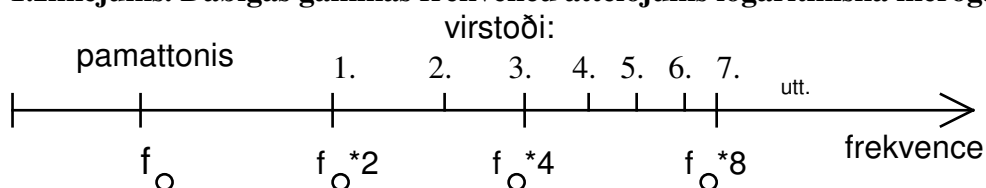
Tonis:	Harmonika	Frekvenču attiecība pret pamattoni:	Frekvenču attiecība pret iepriekš. toni:	Intevāla nosaukums:
Pamattonis	1.harmonika	1:1	1:1	Prīma
1. virstonis	2.harmonika	2:1	2:1	Oktāva
2. virstonis	3.harmonika	3:1	3:2	Kvinta
3.virstonis	4.harmonika	4:1	4:3	Kvarta
4. virstonis	5.harmonika	5:1	5:4	Dabīgā lielā terca
5. virstonis	6.harmonika	6:1	6:5	Dabīgā mazā terca
6. virstonis	7.harmonika	7:1	7:6	nav
7. virstonis	8.harmonika	8:1	8:7	nav
8. virstonis	9.harmonika	9:1	9:8	Dabīgā sekunda
9. virstonis	10.harmonika	10:1	10:9	nav

10. virstonis	11.harmonika	11:1	11:10	nav
utt.	utt.	utt.	utt.	utt.

Šo gammu teorētiski var turpināt bezmaz bezgalīgi, bet praktiski to ierobežo katra instrumenta skanējuma īpašības.

Ņemot vērā to, ka cilvēka dzirdes aparāts gan melodijā (sekojošās skaņās), gan akordā (vienlaicīgās) uztver nevis absolūto skaņas augstumu, bet relatīvo, viņam šķiet, ka skaņas augstums dabīgajā gammā katram nākošajam virstonim palielinās arvien mazāk. Jo, piemēram, pirmais virstonis ir divas reizes augstāks par pamattoni, bet ceturtais virstonis tikai $5/4$ reizi augstāks par iepriekšējo. Skaņas intervāls t.i. subjektīvais "attālums" starp dažāda augstuma skaņām, kas tiek noteikts kā frekvenču attiecība, otrajā gadījumā ir mazāks. Tā "braucot uz augšu" pa virstoņiem virstoņiem skaņas intervāli kļūst arvien mazāki, jo arvien mazāka kļūst frekvenču attiecība. Lai attēlotu relatīvo dabīgās gammas skaņu augstumu, ērti izvēlēties atskaites sistēmu, kur katra nākamā iedaļa attēlo noteiktu reizu skaitu augstāku (vai zemāku) skaņu. Mērogs tādai skalai sanāk logaritmisks:

1.zīmējums. Dabīgās gammas frekvenču attēlojums logaritmiskā mērogā



Šādā mērogā labi redzams, ka skaņas subjektīvais augstums dabīgajā (mēdz teikt arī - virstoņu) gammā pieaug arvien mazāk. Mazākais skaņas intervāls izveidojās kā mazākā iespējamā virstoņu attiecība šāda tipa flautai. Izmantojot t.s. pārpūšanu (augstāku virstoņu iegūšana ar spēcīgāku gaisa strūklu, kas liek sadalīties gaisa stabam flautā vairākās daļās) dažādām flautām var iegūt vēl dažus virstoņus uz augšu, kas noveda pie tā, ka dažādām tautām šis sīkākais skaņas intervāls ir dažāds. Eiropā kā sīkākais skaņas intervāls pieņemts pustonis kas ir $2^{1/12}$ daļa no oktāvas, citām - "precīzākām" - tautām ir arī trešdaļtoņi un ceturtdaļtoņi [1,26. lpp.].

Attīstoties gaumei un zināšanām par skaņu intervāliem, attīstījās arī mūzikas instrumenti. Tika izveidota flauta, kurai bija vairākas stabules, kas savstarpēji veidoja dažādus skaņas intervālus (t.s. Pāna flauta). Cilvēki ievēroja, ka labskanīgi nav visi intervāli, bet tikai tie, kurus veido stabules, kuru garumu attiecība ir nelieli veseli skaitļi.

Tad arī sākās nopietna skaņas intervālu pētīšana, kā rezultātā cilvēki no visiem dabīgās skaņurindas "piedāvājumiem" intervāliem atlasīja tikai dažus - "labskanīgākos". Tā 1500 - 1200 g.p.m.ē. izveidojās diatoniskā gamma - skaņu kopa, kurā izmantoja tikai septiņus toņus (skaņas) vienā oktāvā, kā dabīgās gammas saīsināts un "uzlabots" variants.

Svarīgus atklājumus akustikā izdarīja Pitagors (570 - 500 g.p.m.ē.). Viņš noskaidroja, ka stīgas vai stabules skaņas augstums ir apgriezti proporcionāls

stabules vai stīgas garumam. Tā tika izskaidrota sakarība, kāpēc labskanīgas ir tieši tādas un ne citādas stīgas vai stabules. Pitagors izveidoja metodi, ar kuru ērti varēja iegūt diatonisko gammu. Metodes pamatā bija tīru akustisko kvintu uzskaitošana un to transponēšana par oktāvu uz augšu vai uz leju. Vienīgi terca Pitagora gammā atšķīrās no diatoniskās gammas. Diatoniskajā gammā izmantoja dabīgo tercu (frekvenču attiecība pret pamattoni 5:4), bet Pitagora gammā tā tika iegūta pastarpināti - kā ceturtā kvinta no pamattona, pazemināta par divām oktāvām:

$$\frac{3}{2} * \frac{3}{2} * \frac{3}{2} * \frac{3}{2} * \frac{1}{4} = \frac{81}{64}$$

Atšķirību starp šīm tercām var uzzināt, aprēķinot to frekvenču attiecības. Šo atšķirību sauc par komu un tā ir:

$$\frac{81}{64} : \frac{5}{4} = \frac{81}{80}$$

Šī atšķirība Pitagora gammā parādās arī citos intervālos, ja tos iegūst pastarpināti, vairākkārt uzskaitojot kvintas. Ja, piemēram, vairākkārt kāda instrumenta stīgas uzskaito uz akustiski tīrām kvintām (frekvenču attiecība tātad ir 3/2), tad pēc divpadsmit soļiem tiek iegūta gandrīz tīra oktāva (frekvenču attiecība aptuveni 2/1), atšķirība ir tieši tik liela, cik liela ir koma. Otrādi, ja mēs līdzīgā veidā uzskaitu ar kvartu metodi (frekvenču attiecība 4/3), tad mēs "oktāvu" iegūtu tieši par komu mazāku. Ja mēs par to neuztrauktos un turpinātu uzsāktu skaņošanu, tad nākamajā oktāvā (augstāk vai zemāk) nesakritība būtu jau divkārtšota koma utt. Šī iemesla dēļ Pitagora gammu mēdz dēvēt par nenoslēgtu.

Pitagora gammā ir viena brīnišķīga īpašība (pie tās mēs vēl atgriezīsimies) - tajā labāk nekā jebkurā citā skaņu sistēmā parādās skaņdarba raksturs. Nevienā citā gammā jautra dziesma neskan tik jautri kā Pitagora gammā, un analogi nav skumjākas dziesmas par šajā gammā atskaņoto. Otra interesantā īpašība ir tā, ka Pitagora gammas terca ir skanīgāka par diatoniskās, ja to atskaņo melodiski (t.i. skaņas atskaņo vienu pēc otras), savukārt, ja to atskaņo harmoniski (t.i. vienlaicīgi), tā skan sliktāk par akustiski tīro diatoniskās gammas tercu. Izmantojot šo dīvaino tercās īpašību (faktiski īpatnējo cilvēka uztveri), diatonisko akustiski tīro tercu sauc arī par harmonisko, bet Pitagora - par melodisko.

Mūziķiem tomēr iepatikās diatoniskās gammas terca, līdz ar to faktiski Pitagora gamma tika aizmirsta, lai gan viņa ieteiktā uzskaitošana metode saglabājās. Ar laiku diatoniskās gammas toņi tika stingri limitēti gan pēc skaita, gan pēc augstuma - diatoniskā gamma dogmatizējās. Tikai "nedaudz" vēlāk Aristotelis (384 - 322 g.p.m.ē.) šajā gammā saskatīja sevišķu dabas un dieva harmonijas izpausmi [1,202. lpp.] un stingri aizstāvēja tajā laikā izveidojušos un stabilizējušos septiņu toņu diatonisko gammu. Daudzi skaitļu attiecībās meklēja toņu dziļāko jēgu.

Stipri vēlāk, viduslaikos, šī gamma tika iecelta dievišķā kārtā, un garīgajiem mūziķiem par atteikšanos no tās draudēja vismaz sevišķa nelabvēlība. Laikā (11.gs.), kad Guido d'Arecco izveidoja šai gammāi nošu rakstu (t.i. apzīmējumus, ar kuriem pierakstīja skaņas augstumu [2,187.lpp.]), tā izskatījās sekojoši:

2.tabula. Pitagora un diatoniskās gammas salīdzinājums.

Toņa nosaukums	ut (do)	re	mi	fa	sol	la	si	ut(do)
Gammas:	Frekvence attiecībā pret pamattoni:							
Pitagora	1:1	9:8	81:64	4:3	3:2	5:3	15:8	2:1
Diatoniskā	1:1	9:8	5:4	4:3	3:2	5:3	15:8	2:1

Laika gaitā tika aizmirsti diatoniskās gammas izcelsmes pirmsākumi, kas mūsdienās ir radījis milzīgus sarežģījumus patreizējās skaņrades un skaņas pierakstes jomā (bet par to šeit runa neies). Galvenā "slimība", ar ko it smagi slimoja šī gamma, bija tā, ka dažādus skaņdarbus, kas tajā tika atskaņoti, nevarēja atskaņot augstāk vai zemāk (transponēt). Nevienādo intervālu dēļ, kas bija starp skaņām, bija būtiski, no kuras vietas skaņdarbu sāk spēlēt. Ja solists nevarēja nodziedāt skaņdarbu tik augstu, cik augstu bija uzskaņots pavadošais instruments, vajadzēja pārskanot visu instrumentu. Tas, protams, bija ļoti neērti, jo tajā laikā bija izveidoti pietiekami sarežģīti stīgu un pūšamie instrumenti (tajā skaitā arī taustiņinstrumenti - ērģeles un klavesīni).

16. gadsimtā, attīstoties daudzvalsībai, atklāja, ka ne diatoniskā, ne Pitagora gammas nespēj apmierināt pret tām izvirzītās prasības. Tajā laikā mūzikā sāka izmantot modulāciju - pāreju no vienas skaņkārtas uz citu. Korim tas nesagādāja lielas problēmas, bet taustiņinstrumentiem, atklājās, ka nepieciešami papildu taustiņi, jo citā tonalitātē spēlējot varēja pietrūkt kādas skaņas. Tādā veidā klaviatūrā tika iekļauti melnie taustiņi, kuru skaits ātri palielinājās līdz pieciem. (Tā izveidojās hromatiskā gamma - diatoniskā gamma iekrāsota ar melnajiem taustiņiem.) Vēlāk parādījās jauna problēma - atkarībā no tā, vai skaņdarbā izpildīja modulāciju uz augšu vai uz leju pret klaviatūrā iekļautajiem melnajiem taustiņiem, izvirzījās dažādas prasības - vienā gadījumā tos vajadzēja augstākus, otrā - zemākus. No pieciem melnajiem taustiņiem izdalījās 2 diēzu (modulācijai uz augstāku tonalitāti) un 2 bemolu taustiņi (modulācijai uz leju). Piektais taustiņš vienās skaņotāju skolās tika pieskaitīts pie bemoliem, citās - pie diēziem [8,13.lpp.]. Un, nedod dievs, ja kāds atskaņotājs iedomājās izmantot kādu diēza taustiņu bemola taustiņa vietā. Kopā ar citiem taustiņiem tas veidoja tik nejauki griezīgu akordu, ka tādus akordus iedēvēja par "vilka akordiem". Terminoloģijā ieviesās "vilka" tercās, kvintas un kvartas.

Bija mēģinājumi sadalīt melnos taustiņus uz pusēm - vienā pusē bemols, otrā - diēzs. Arī tas neko daudz nepalīdzēja, jo atklājās, ka nepārtraukti modulējot no vienas skaņkārtas uz citu, gammā jāieved arvien jaunas skaņas - rezultātā tikai oktāvas ietvaros vajadzēja 31 taustiņu !!! [8,22.lpp.]. Tas, protams, bija sliktas risinājums, jo daudzi tā laika mūziķi uzskatīja, ka pilnīgi pietiek ar 12 taustiņiem oktāvā, un ka vaina nav klaviatūrā, bet skaņu sistēmā.

Tā aizsākās skaņas "pielabošana" jeb temperācija. Mūziķi centās pamainīt kāda taustiņa skaņu tā, lai tas puslīdz skanētu kopā ar visiem taustiņiem. Pirmie pieņemamie risinājumi tika panākti ar t.s. nevienmērīgo temperāciju, kurā tika pielaboti tikai daži no gammas taustiņiem. Viena no vecākajām metodēm bija Petro Ārona 1523.g. piedāvātā nevienmērīgā temperācija [8,15.lpp.]. Līdzīgas bija arī t.s.

vidustona, E. Ammerbaha u.c. analogas temperācijas. Visu šo temperāciju līdzība bija nevienmērīgums (temperēja tikai dažas kvintas), atsevišķi iedalīti diēzu un bemolu taustiņi un katrai savi "vilka" akordi.

Nākošais solis temperācijā bija enharmoniskās gammās ieviešana. Tajā daži toņi, (parasti diēzi un bemoli), kuru nosaukumi un augstumi hromatiskajā gammā ir dažādi, tika temperēti tā, ka to augstumi sakrita - t.i. tie skanēja vienādi. Šo gammu izveidoja Itālijā Džovanni Lafranko 1533.g. Arī šī gamma bija nevienmērīgi temperēta, tikai, atšķirībā no iepriekšējām, tajā "nevienmērīguma" bija mazāk. Šajā gammā tika temperētas ne tikai kvintas, bet arī tercās un kvartās, vienīgi oktāvu atstājot kā pilnīgi tīru intervālu. Rezultātā tīru, netemperētu skaņas intervālu (tātad arī akordu) tajā kļuva mazāk, bet toties izzuda arī neciešamie "vilka" akordi starp atsevišķām skaņām. Neraugoties uz to, ka pats autors šo gammu veidoja kā nevienmērīgi temperētu, tā bija ļoti tuva mūsdienu vienmērīgi temperētajai gammai [8,33.lpp.].

Pirmo matemātisko modeli vienmērīgi temperētai gammai izveidoja Marēns Mersens (1588 - 1648) [8,62.lpp.]. Viņa aprēķini, ja neskaita divas nelielas kļūdas, ļoti labi atbilda precīzai temperētajai gammai.

Neskatoties uz vienmērīgi temperētās gammās popularitāti, nevienmērīgajai temperācijai bija daudz ietekmīgu aizstāvju. Viens no izcilākajiem bija fiziķis un mūziķis Andreass Verkmeisters (1645 - 1706) [8,64.lpp.]. Viņš centās izveidot ideālu nevienmērīgi temperētu gammu. Daudzu gadu garie eksperimentu rezultāti pētnieku neapmierināja, un viņš veidoja jaunas un jaunas sistēmas. Galu galā Verkmeisters panāca izcilu meistarību gammās veidošanas un kontroles jomā, un, pats to negribot, pietuvojās maksimāli tuvu vienmērīgajai temperācijai. Rezultātā A. Verkmeisteram piedēvē vienmērīgi temperētās gammās izveidošanu, (kad viņš 1698.g. publicēja savu pēdējo darbu [8,77.lpp.]), lai arī viņš pats svēti ticēja nevienmērīgajai temperācijai un absolūti tīrām kvintām.

A. Verkmeisters palika neapmierināts ar savu "nevienmērīgi" (viņš taču tādu centās iegūt) temperēto gammu tādēļ, ka tajā vienīgais akustiski tīrais intervāls bija oktāva. Pārējie intervāli bija "zaudējuši asumu", tiem trūka tā dzidruma un tīrības, kāda tiem piemita diatoniskajā vai hromatiskajā gammā. Daudzi citi mūziķi ar viņu nebija vienis prāti un saskatīja šādā skaņojumā daudzas labas īpašības - tā kā diēzi un bemoli tajā skanēja vienādi augstu (tie bija enharmoniski), skaņdarbu varēja modulēt uz jebkuru tonalitāti. Pie tam, daudz balsīgai muzicēšanai vienmērīgi temperētā gamma piedāvāja daudz labskanīgākus akordus.

Vienmērīgi temperētās gammās pozitīvās īpašības labi atspoguļoja J.S. Bahs mācību līdzeklī "Vienmērīgi temperēts klavesīns, jeb ...". Tajā efektīvi bija izmantotas gammās piedāvātās iespējas - modulācija un enharmonisko skaņu izmantošana.

Sekojošajā tabulā tiek salīdzināta hromatiskā gamma (t.i. diatoniskā gamma + diēzi un bemoli, kas iegūti pēc Pītagora kvintu metodes) un vienmērīgi temperētā gamma.

3.tabula. Hromatiskās un temperētās gammas salīdzinājums:

Hromatiskā gamma		Temperētā gamma		Kļūda	Nosaukums	
Frekvence att. pret do precīzi	Frekvence att. pret do decimāldaļa	Frekvence (Hz)	Frekv. att. pret do decimāldaļa	Frekvence (Hz)	dabiskā - temperētā (Hz)	
1:1	1.000	264.00	1.000	261.63	2.37	Do
25:24	1.042	275.00	1.059	277.18	-2.18	Do#
27:25	1.080	285.12	1.059	277,18	7.94	Re♭
9:8	1.125	297.00	1.122	293.66	3.34	Re
75:64	1.172	309.38	1.189	311.13	-1.75	Re#
6:5	1.200	316.80	1.189	311.13	5.65	Mi♭
5:4	1.250	330.00	1.260	329.63	0.37	Mi
32:25	1.280	337.92	1.260	329.63	8.29	Fa♭
125:96	1.302	343.73	1.335	349.23	-5.48	Mi#
4:3	1.333	352.00	1.335	349.23	2.77	Fa
25:18	1.389	366.67	1.414	369.99	-3.33	Fa#
36:25	1.440	379.44	1.414	369.99	10.17	Sol♭
3:2	1.500	396.00	1.498	392.08	4.00	Sol
25:16	1.562	412.50	1.587	415.30	-2.80	Sol#
8:5	1.600	422.40	1.587	415.30	8.00	La♭
5:3	1.667	440.00	1.685	440.00	0.00	La
125:72	1.736	458.33	1.782	466.16	-7.83	La#
9:5	1.800	475.20	1.782	466.16	9.04	Si♭
15:8	1.875	495.00	1.883	493.88	1.12	Si
48:25	1.920	506.88	1.883	493.88	13.00	Do♭
125:64	1.953	515.62	2.000	523.25	-7.63	Si#
2:1	2.000	528.00	2.000	523.25	4.75	Do

Salīdzinot temperēto un hromatisko gammu var redzēt, ka temperētajā gammā var atrast gandrīz tīras kvintās, kvartās, u.c. skaņu intervālus. Jāņem vērā arī tas, ka temperētajā gammā daudzi akustiskie intervāli, kas ir dažādi hromatiskajā gammā, ir vienādi temperētajā, jo temperētajai gammai ir pārāk "rupjš" dalījums, lai atainotu tādas atšķirības (piem. mi# un fa temperētajā gammā skan vienādi).

Izrādās - tam apstāklim, ka oktāvā ir tieši divpadsmit vienādi intervāli (pustoņi), nav nekādas dziļākas mistiskas jēgas. Tikpat labi mēs oktāvā varējām izvēlēties 18 daļas (t.s. teršdaļtoņus kā arābi) vai 24 daļas (attiecīgi ceturtdaļtoņus kā indieši). Nepieciešams tikai, lai daļu skaits oktāvā labi dalītos ar pēc iespējas daudziem nelieliem skaitļiem. Tad mēs, tos kombinējot, varētu atrast aptuvenās kvintās, kvartās, tercās, utt. Tieši šī iemesla dēļ daudzi mūsdienu mūzikas teorētiķi uzskata, ka tagadējais oktāvas dalījums ir pārāk nepilnīgs, jo nespēj atainot visām pasaules tautām raksturīgos mūzicēšanas veidus. Tas, protams, liktu atteikties no

līdzšinējām klavierēm, kurām baltie taustiņi attēlo diezgan precīzu diatoniskās gammās tuvinājumu, bet melnie taustiņi ir tie, kas no tās "krīt ārā".

Tālāk mēs apskatīsim temperēto gammu tādu kāda tā ir patlaban (arī saistībā ar citām gammām) - tās matemātisko modeli, gammās iegūšanas un kontroles paņēmienus, pielietojumu, un problēmas, kas rodas šajos dažādajos posmos. Bez tam, centīsimies to saistīt ar tīri fizioloģiskajām cilvēka dzirdes īpatnībām.

1.Nodaļa

Temperētās gammas matemātiskais modelis, tā pielietojums elektroniskajos instrumentos

Iepriekš temperētās gammas matemātisko modeli mēs jau aplūkojām, bet tagad analizēsim to rūpīgāk.

Tā kā cilvēka dzirde ir "uzbūvēta" tā, ka skaņu intervālus tā atšķir tikai relatīvi, tad ir izdevīgi gammu veidot logaritmisku - t.i. katru nākošo augstāko vai zemāko skaņas intervālu palielināt nevis par tik, bet - tik reizes.

Kā pamatintervāls temperētajā gammā ir izvēlēta oktāva - t.i., no divām skaņām, kas atrodas intervāla galos, viena ir tieši divas reizes augstāka (zemāka) par otru, jeb tās frekvence attiecīgi divas reizes lielāka vai mazāka par iepriekšējo. Oktāva tiek dalīta divpadsmit mazākos intervālos - pustoņos.

Pustoņa lielumu (intervāla frekvenču attiecību) var izrēķināt ļoti vienkārši - tas ir elementārās matemātikas līmenī:

$$x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x * x = x^{12} = 2$$

no tā var izrēķināt, ka

$$x = \sqrt[12]{2} \approx 1.059463$$

Tātad katra nākamā pustoņa frekvence ir ~ 1,059463 reizes lielāka par iepriekšējo un divpadsmitā pustoņa frekvence ir 2 reizes lielāka par pirmā toņa frekvenci. Lai precīzi noteiktu frekvenci vai to attiecību, akustikā izmanto arī tādas vienības kā centu (tā nav naudas vienība!) - simto daļu no pustoņa un milioktāvu:

$$1 \text{ cents} = 2^{\frac{1}{1200}} \approx 1.00057$$

$$1 \text{ milioktāva} = 2^{\frac{1}{1000}} \approx 1.00069$$

Kā redzams, milioktāva un cents ir diezgan līdzīgas vienības. Operējot ar pustoņiem, ērtāk izmantot centus, bet operējot ar oktāvām - milioktāvas.

Kā jebkurā logaritmiskā skalā (mūsu gadījumā gammā), nepieciešams izveidot t.s. "nulles līmeni" - lielumu, pret ko šo attiecību mērīt. Izvēloties šo atskaites punktu citu, mēs iegūsim citu skalu (gammu).

Akustikā par frekvences "nulles līmeni" izvēlēts pirmās oktāvas la, kam noteikta frekvence 440 Hz, kuru sauc par pamatfrekvenci. Kad ir nodefinēts šāds atskaites punkts, tad var aprēķināt visu pārējo pustoņu augstumu:

$$\frac{f_x}{f_0} = 2^{\frac{x}{12}} \quad f_x - \text{nosakāmā frekvence } f_0 - \text{pamatfrekvence}$$

x – intervāla vērtība pustošos

Tā kā $f_0 = 440(\text{Hz})$ tad $f_x = 440 * 2^{\pm \frac{x}{12}}(\text{Hz})$, kur kāpinātājam ir zīme +, ja nosakāmā frekvence ir lielāka, bet zīme -, ja mazāka par pamatfrekvenci.

Izmantojot šādu matemātiku, var aprēķināt visu mūzikā izmantojamo skaņu augstumu no subkontraktāvas līdz pat piektajai oktāvai. Skaņu augstumus var aplūkot tabulā.

4.tabula. Temperētās gammās skaņu frekvences:

Oktāvas	Nots nosaukums / Frekvence (Hz)											
nosaukums:	Do	Do#	Re	Re#	Mi	Fa	Fa#	Sol	Sol#	La	La#	Si
Subkontraktāva	16.3515	17.3239	18.3540	19.4454	20.6017	21.8267	23.1246	24.4997	25.9565	27.5000	29.1352	30.8677
Kontraktāva	32.7031	34.6478	36.7080	38.8908	41.2034	43.6535	46.2493	48.9994	51.9130	55.0000	58.2704	61.7354
Lielā oktāva	65.4063	69.2956	73.4161	77.7817	82.4068	87.3070	92.4986	97.9985	103.826	110.000	116.540	123.470
Mazā oktāva	130.812	138.591	146.832	155.563	164.813	174.614	184.997	195.997	207.625	220.000	233.081	146.941
Pirmā oktāva	261.625	277.182	239.664	311.126	329.625	349.228	369.994	391.995	415.304	440.000	466.163	493.883
Otrā oktāva	523.251	554.356	587.329	622.253	659.255	698.456	739.988	783.990	830.609	880.000	932.327	987.766
Trešā oktāva	1046.50	1108.73	1174.65	1244.50	1318.51	1396.91	1479.97	1567.98	1661.21	1760.00	1864.65	1975.53
Ceturta oktāva	2093.00	2217.46	2349.31	2489.01	2637.02	2793.82	2959.95	3135.96	3322.43	3520.00	3729.31	3951.06
Piektā oktāva	4186.00	4434.92	4698.63	4978.03	5274.04	5587.65	5919.91	6271.92	6644.87	7040.00	7458.62	7902.13
Sestā oktāva	8372.01	8869.84	9397.27	9956.06	10548.1	11175.3	11839.8	12543.8	13289.8	14080.0	14917.2	15804.3
Septītā oktāva	16744.0	17739.7	18794.6	19912.1	21096.2	22350.6	23679.6	25087.7	26579.5	28160.0	29834.5	31608.5

Temperētajā gammā ar lielāku vai mazāku precizitāti var atrast akustiski tīrus intervālus, kādus izmantoja mūzikā līdz tās ieviešanai (diatoniskajā gammā) un kuri subjektīvi cilvēkam veido labskaņas sajūtu (skat. 1. un 3. tabulu!).

Pamatojoties uz šādu vienkāršu aritmētiku, mūsdienās temperēto gammu iegūst elektroniskajos skaņas sintezatoros. Līdz nesenam laikam, kāmēr gandrīz visu radioelektroniku neiekaroja ciparu shēmas, sintezatoros šādu gammu ieguva ar divpadsmit ģeneratoriem, kuru radītās skaņas frekvenci transportēja no agstākām oktāvām uz zemākām ar parastu divkāršo dalīšanu. Šādi skaņas sintezatori (bijušās padomju savienības "Junost" kā sliktākais variants) bija diezgan grūti uzskatājami un tāpēc ne visai ērti lietošanā. Pie tam šādu sintezatoru ģeneratoru frekvence "peldēja" (t.i. mainījās) pēc visiem iespējamiem parametriem - temperatūras, mitruma, nolietojamības pakāpes, barojošā tīkla sprieguma un kā tik vēl ne. Tas viss ierobežoja to izmantojamības robežas.

Tagad gammas iegūšanai sintezatorā izmanto nedaudz sarežģītāku, bet daudz ērtāku paņēmieni. Ļoti augstas frekvences (\approx MHz un augstākas) signālu (t.s. atbalstsīgnālu) ar speciāliem dalītājiem izdala noteiktu reižu skaitu. Dalītāju darbības principos neiedziļināsimies, jo tā ir pietiekoši plaša lieta pati par sevi, bet īsumā mēs to aprakstīsim.

Ar speciāli apvienotiem skaitītājiem tiek panākts tāds rezultāts, ka pievadot skaitītāju ieejā vienu noteiktu atbalstsīgnāla periodu (mēdz teikt arī taktu) skaitu, to izejā tiek padots kāds cits, mazāks periodu skaits. Piemēram, kad skaitītāju ieejā tiek pievadīti 10 atbalstsīgnāla periodi (taktis), to izejā parādās tikai 8 taktis. Līdz ar to skaitītāju shēma ieejas signāla frekvenci ir izdalījusi ar racionālu skaitli, kura skaitītājā ir izejas taktu skaits (8), bet saucējā - ieejas taktu skaits (10). Dalīšanas koeficients, kam teorētiski būtu jābūt iracionālam skaitlim (gammā iegūšanā tiek izmantotas neveselas 2 pakāpes, kas ir iracionāli skaitļi), tiek aproksimēts līdz tuvākajam racionālajam skaitlim. Jo garāki skaitļi šādas attiecības iegūšanai tiek izmantoti, jo lielāka ir dalīšanas koeficienta aproksimācijas precizitāte. Reāli, lai sasniegtu apmierinošu precizitāti, aprobežojas ar $5 \div 6$ zīmju skaitļiem.

2.zīmējums. Vienkāršota dalītāja funkcionālā shēma:



Bijušajā padomju tehnoloģijā šādi speciāli dalītāji ir "izvietoti" divās mikroshēmās RH 1012 UG1 un RH 1012 UG2 [5]. To ieejā pievada signālu ar frekvenci 1.06295 Mhz, to izejās ir tāda frekvence, kāda tiek iegūta ar attiecīgo dalīšanas koeficientu. Interesanti piezīmēt, ka izejas signālu frekvence aptver veselas 2 oktāvas, kas viena no otras pēc kļūdām neatšķirās. Tas norāda uz to, ka to izejās viena oktāva tiek transponēta uz zemāko ar visparastāko divkāršo dalīšanu.

5.tabula. Tonālo dalītāju RH 1012 UG1 un RH 1012 UG2 gammas salīdzinājums ar teorētisko temperēto gammu [pēc 5]:

Dalīšanas koeficients	f_0 (Hz)	f_t (Hz)	Starpība $f_0 - f_t$ (Hz)	$\frac{f_0}{f_t}$	Starpība centos	Oktāva	Nots nos.
127	8369.69	8372.01	-2.33	0.999721	0.999143	6	Do
119.875	8867.15	8869.84	-2.69	0.999696	0.999119	6	Do#
113.125	9396.24	9397.27	-1.02	0.999890	0.999313	6	Re
106.75	9957.38	9956.06	1.31	1.000132	0.999554	6	Re#
100.75	10550.37	10548.08	2.29	1.000217	0.999639	6	Mi
95.125	11174.24	11175.30	-1.05	0.999905	0.999327	6	Fa
89.75	11843.45	11839.82	3.63	1.000307	0.999729	6	Fa#
84.75	12542.18	12543.85	-1.67	0.999866	0.999289	6	Sol
80	13286.88	13289.75	-2.87	0.999783	0.999206	6	Sol#
75.5	14078.81	14080.00	-1.19	0.999915	0.999337	6	La
71.25	14918.60	14917.24	1.35	1.000091	0.999513	6	La#
67.25	15805.95	15804.27	1.68	1.000106	0.999528	6	Si
63.5	16739.37	16744.04	-4.66	0.999721	0.999144	7	Do
59.9375	17734.31	17739.69	-5.38	0.999696	0.999119	7	Do#
56.5625	18792.49	18794.55	-2.05	0.999890	0.999313	7	Re
53.375	19914.75	19912.13	2.62	1.000132	0.999554	7	Re#
50.375	21100.74	21096.16	4.58	1.000217	0.999639	7	Mi
47.5625	22348.49	22350.61	-2.11	0.999905	0.999327	7	Fa
44.875	23686.91	23679.64	7.26	1.000307	0.999729	7	Fa#
42.375	25084.37	25087.71	-3.34	0.999866	0.999289	7	Sol
40	26573.75	26579.50	-5.75	0.999783	0.999206	7	Sol#
37.75	28157.62	28160.00	-2.38	0.999915	0.999337	7	La
35.625	29837.19	29834.48	2.71	1.000091	0.999513	7	La#
33.625	31611.90	31608.53	3.36	1.000106	0.999528	7	Si
31.75	33478.74	33488.07	-9.33	0.999721	0.999144	8	Do

f_0 – tonālā dalītāja toņu frekvence,

f_t – teorētiskās temperētās gammas toņu frekvenc

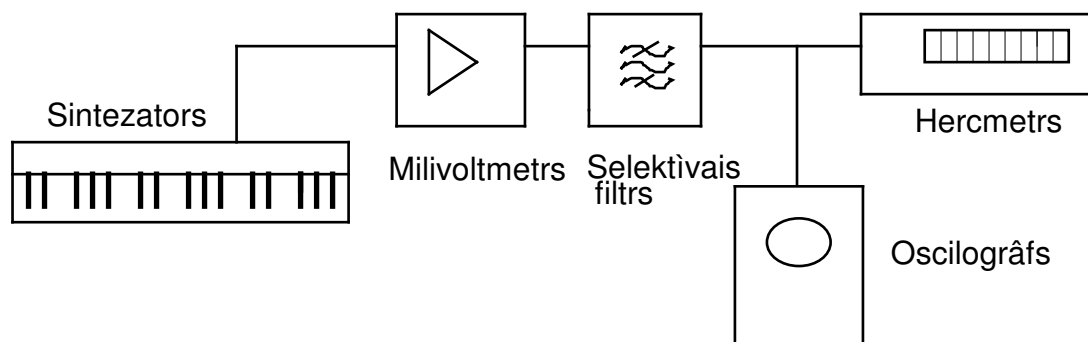
Tā kā mūzikā tik augstas oktāvas kā 6. un 7. praktiski netiek izmantotas, tad elektroniskajos mūzikas instrumentos šīs toņu frekvences tiek vēl tālāk transponētas uz leju ar divkāršās dalīšanas metodi, kas cīparu tehnikā ir visvienkāršākais darbības veids.

Var redzēt, ka ģenerators gamma ļoti maz atšķiras no teorētiskās temperētās gammas. Salīdzināšanai autors papūlējās noteikt gammas precizitāti arī kādam rietumvalstu ražojumam, bet tā kā viņu ražošanas sistēmā nav pieņemts informēt lietotājus par tādiem tehniskiem sīkumiem, tad autors šos raksturlielumus noteica eksperimentāli.

Par "izmēģinājumu trusīti" kalpoja firmas "Yamaha" sintezators "Yamaha PSR-36".

Eksperimentālās iekārtas principiālo shēmu var aplūkot sekojošajā zīmējumā:

3.zīmējums.Eksperimentālās iekārtas shēma.

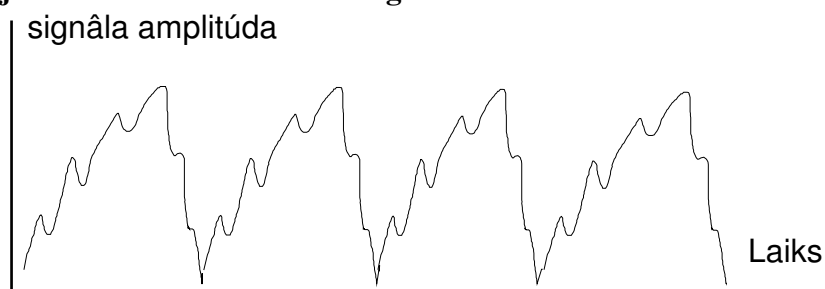


Iekārtas apraksts.

Eksperimentālā iekārta ir tik sarežģīta sekojošu iemeslu dēļ. Tā kā jāpanāk salīdzinoši liela mērījumu precizitāte (5 zīmīgie cipari), tad ar ciparu hercmetru (fakt. vadāmu skaitītāju) tiek mērīta nevis uzreiz signāla frekvence, bet periods. To nosaka hercmetra darbības īpatnības jo hercmetrs skaita, cik viena signāla periodu (taktu) ievietojas otra signāla periodā. Tā kā skaņas svārstību periods ir salīdzinoši mazs, tad ērtāk un precīzāk ir mērīt, cik daudz īsāku periodu ieiet tajā, nevis otrādi.

Papildu grūtības rada tas, ka hercmetrs precīzi nosaka periodu tikai sinusoīdai, bet sintezators rada visdažādākos periodiskus signālus, tikai ne sinusoīdu, pie tam visi šie signāli tiek nedaudz modulēti ar augstfrekvences signālu, kas radīja papildu neprecizitātes mērījumos.

4.zīmējums.Viena no sintezatora signāla formām:



Lai ar visu to tiktu galā, tiek izmantots selektīvais pastiprinātājs, kas nofiltrē signāla augstākās un zemākās harmonikas. Signāla forma pastiprinātāja izejā tiek kontrolēta ar oscilogrāfu -"uz aci". Milivoltmets tiek izmantots tikai kā priekšpastiprinātājs (nekā cita analoga pie rokas nebija), jo hercmetrs nespēj precīzi

uztvert tik maza līmeņa signālu, kāds nāk ārā no sintezatora. Papildus milivoltmetrs tiek izmantots arī signāla līmeņa kontrolei.

Mērījumu rezultāti.

6.tabula.Sintezatora "Yamaha PSR-36" gamma.

Nots nos.	Skaņas periods milisekundēs.					
	Kontroktāva	Lielā oktāva	Mazā oktāva	Pirmā oktāva	Otrā oktāva	Trešā oktāva
Do	15.298	7.651	3.8425	1.9123	0.95609	0.47805
Do#	14.441	7.220	3.609	1.8047	0.90233	
Re	13.635	6.816	3.408	1.7039	0.85197	
Re#	12.868	6.433	3.216	1.6081	0.80408	
Mi	12.143	6.072	3.036	1.5180	0.75899	
Fa	11.459	5.730	2.865	1.4325	0.71628	
Fa#	10.816	4.408	2.704	1.3519	0.67595	
Sol	10.213	5.105	2.552	1.2760	0.63808	
Sol#	9.638	4.817	2.408	1.2043	0.60216	
La	9.097	4.547	2.273	1.1367	0.56842	
La#	8.585	4.292	2.1463	1.0730	0.53655	
Si	8.105	4.051	2.0258	1.0128	0.50641	

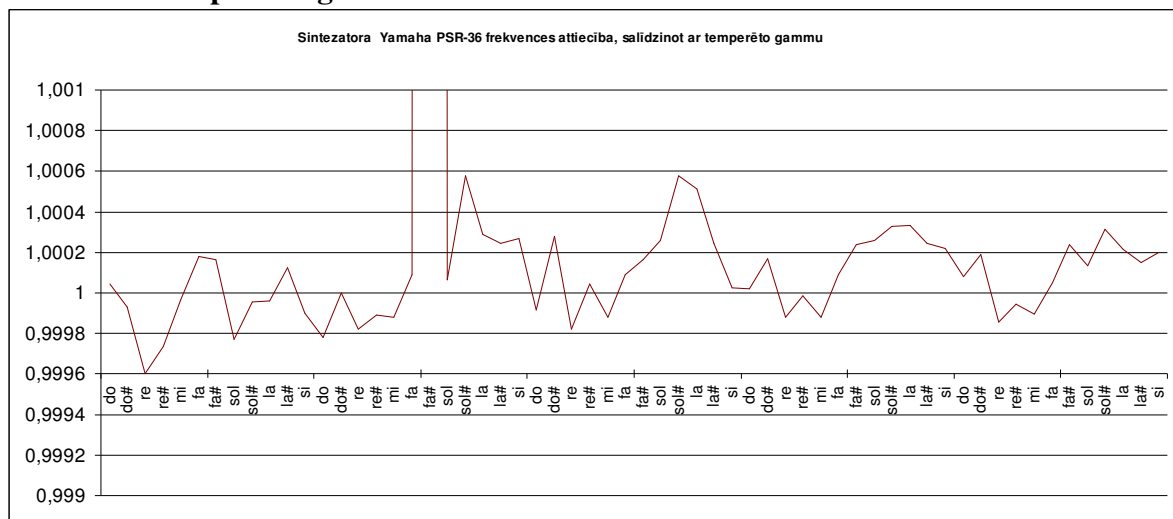
Sintezatoram ir paredzēta arī pieskaņošana kādam citam instrumentam. Ar divām pogām diskrēti nedaudz paaugstinot vai pazeminot visu gammu, tiek paaugstināta vai pazemināta atbalstsignāla frekvence, līdz ar to arī visa instrumenta gamma. Vienu reizi nospiesta poga, tika nodēvēta par "krikšķi".

7.tabula.Sintezatora gammas pieskaņošanas diapazons (mērīts pēc trešās oktāvas Do, tikai uz paaugstināšanas pusi, jo tika noskaidrots, ka uz otru pusi ir līdzīgi):

Periods milisekundēs	0.47805	0.47715	0.47628	0.47528	0.47439	0.47351	0.47253	0.47166
"Krikšķi"	0	1	2	3	4	5	6	7
Periods milisekundēs	0.47079	0.46982	0.46896	0.46807	0.46712	0.46629	0.46540	0.46450
"Krikšķi"	8	9	10	11	12	13	14	15

Neiedziļinoties rezultātu matemātiskajā apstrādē uzreiz uzskatāmi attēlosim instrumenta un tonālā dalītāja gammas kļūdu attiecībā pret teorētisko temperēto gammu.

5.zīmējums.Tonālā dalītāja un sintezatora "Yamaha" gammas novirzes no teorētiskās temperētās gammas.



Var redzēt, ka šīs novirzes ir dažādas, kas norāda, ka lai arī gammas iegūšanas princips ir līdzīgs, tomēr tiek izmantoti citi dalīšanas koeficienti.

Sintezatora gammā redzams, ka vairākām oktāvām kļūdas izskats ir līdzīgs - toņi tiek iegūti, vienkārši augstāko toņu frekvences dalot ar 2. Kontroktāvā "zāģa" izskats tomēr ir atšķirīgs.

Pirmais izskaidrojums autoram bija tāds, ka lielākas precizitātes labad, šeit dalīšanas koeficients varētu būt "pielabots", lai panāktu lielāku gammas precizitāti. Dziļāk izpētot šo sfēru un apskatot literatūru, tika noskaidrots, ka nekur netiek izmantota papildu shēmas sarežģīšana, lai kaut ko "pielabotu" tikai vienā atsevišķā oktāvā, jo tas prasa lielu shēmas sarežģīšanu, bez vērā ņemama uzlabojuma efekta.

Tas, ka sintezatora gamma ir nedaudz paaugstināta (~1.2 centi), nav svarīgi, jo visa instrumenta gamma ir pieskaņojama uz augšu un leju par ~ 20 centiem ar soli ~1.2 centi, līdz ar to šo sistemātisko kļūdu var novest līdz minimumam.

Ja augšminētās gammas nebūtu panāktas tuvu teorētiskajai ar tik milzīgu precizitāti (centa simtdaļas), varētu runāt par to, kā izmantot nedaudz paaugstinātos toņus, lai iegūtu vēl skumjāku minoru, vai jautrāku mažoru. Bet, tik mazu skaņas augstuma novirzi cilvēks nav spējīgs pamanīt. Kopumā ņemot, var apgalvot, ka elektroniskās iekārtas ir precīzs teorētiskās temperētās gammas iemiesojums dzīvē ar visām šīs gammas labajām un sliktajām īpašībām.

2.Nodaļa

Vienmērīgi temperētās gammas iegūšana ar t.s. sitienu metodi

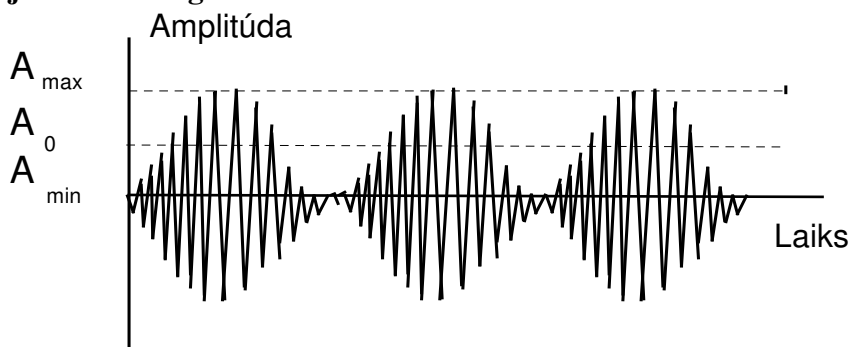
2.1. Gammas iegūšana, ja skaņas avoti ir harmoniski

Iepriekšējā nodaļā apskatījām, kā temperēto gammu vairāk vai mazāk precīzi var iegūt tiešā veidā - nosakot frekvenci, taču jau kopš 16.gs. akustisko mūzikas instrumentu uzskaņošanai izmanto t.s. sitienu metodi.

Skaņas sitienu ir akustiska parādība, kas notiek, skatot diviem avotiem ar ļoti tuvām frekvencēm ($|f_1 - f_2| \ll |f_1 + f_2|$). Visvienkāršākais sitienu gadījums ir divu harmonisku svārstību summēšanās ar vienādām amplitūdām A_0 (max. atvirzes attālums, subjektīvi dzirdei saistās ar skaļumu), vienādām sākuma fāzēm (sākuma atvirzēm) un tuvām frekvencēm $f_1 \approx f_2$; $f_1 \gg f_2$.

Iegūtā aina tad ir šāda:

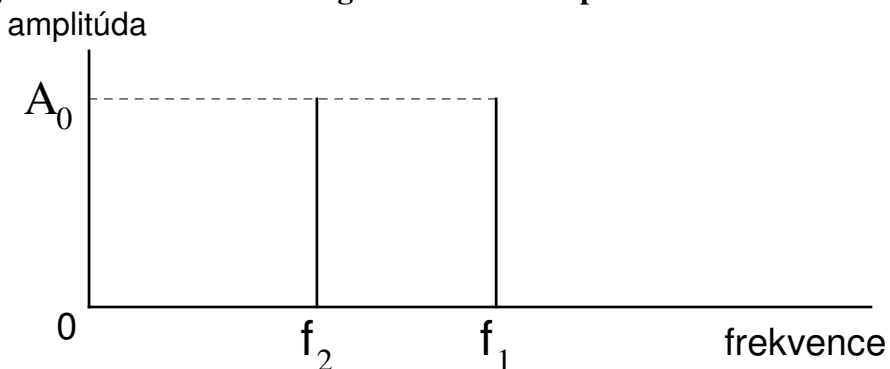
6.zīmējums. Divu signālu ar tuvām frekvencēm sitienu izskats:



t – laiks, A – amplitūda, A_{\max} – maksimālā, A_{\min} – minimālā amplitūdas

Ja šādu parādību atēlo frekvenču spektrā (signāla amplitūdas atkarība no frekvences), tad iegūstam sekojošu ainu:

7.zīmējums. Divu harmonisku signālu frekvenču spektri:



Ja f_1 un f_2 frekvenču starpība ir tik maza, ka cilvēka dzirdes aparāts to vairs nespēj atšķirt, tad subjektīvi dzirdes sajūta veidojas tāda, ka signāls ar frekvenci $\frac{f_1 + f_2}{2}$ (tātad vidējo aritmētisko), mainītu savu skaļumu ar frekvenci $\frac{f_1 - f_2}{2}$.

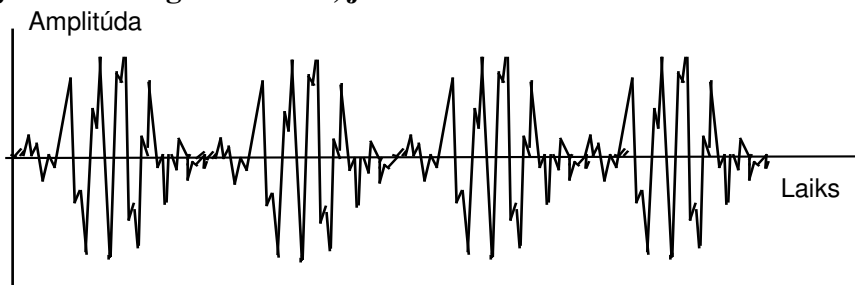
Var uzskatīt, ka dzirde ar signālu izdara šādu transformāciju:

$$\sin 2\pi f_1 t + \sin 2\pi f_2 t = 2 \cos \frac{2\pi f_2 - f_1}{2} t \cdot \sin \frac{2\pi f_2 + f_1}{2} t$$

Šo signāla šķietamo skaļuma maiņu arī sauc par sitieniem (reāli taču ir divi signāli ar nemainīgām amplitūdām!).

Līdzīgi sitieni veidojas arī tad, ja signālu frekvenču attiecība ir nevis $\approx 1:1$, bet $\approx 2:1$, $2:3$ utt. Ja signālu frekvenču attiecība ir tuva $2:1$ (piem. $2.1:1$), tad aina izveidojas sekojoša:

8.zīmējums. Divu signālu sitieni, ja frekvenču attiecība ir tuva veseliem skaitļiem:



Šajā gadījumā mūsu dzirde izdara līdzīgu (tikai nedaudz sarežģītāku) signāla transformāciju:

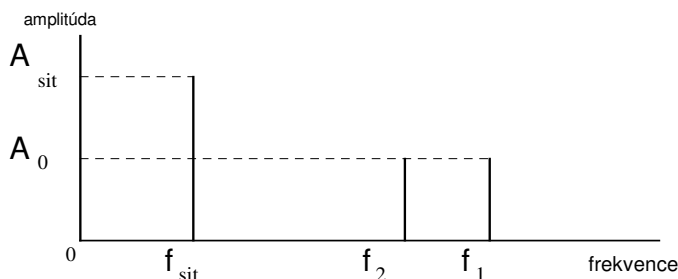
$$\sin 2\pi q f_1 t + \sin 2\pi p f_2 t = 2 \cos 2\pi \frac{p f_2 - q f_1}{2} t \cdot \sin 2\pi \frac{p f_2 + q f_1}{2} t$$

$p f_1 \approx q f_2$, jeb $\frac{q}{p} = \frac{f_2}{f_1}$ ar precizitāti līdz racionālam skaitlim (t.i. p un q ir veseli

skaitļi, lai arī $f_1: f_2$ attiecība nav veseli skaitļi).

Rezultāts ir tāds, ka mums šķiet, ka signālu frekvenču attiecība ir precīzi $2:1$, bet tie papildus tiek modulēti ar frekvenci, kas ir šo signālu precīzās attiecības starpības pusi.

10.zīmējums.Divu signālu frekvences spektrs, kādu to sajūt cilvēks:



$$f_{sit} - \text{sitienu frekvence, } f_{sit} = \frac{|qf_1 - pf_2|}{2}$$

Bez tam, svarīgi piezīmēt, ka nav iespējams atšķirt, vai f_2 attiecībā pret f_1 ir nedaudz par lielu vai mazu (skaņa attiecīgi par augstu vai zemu). Teorētiski gan to varētu noteikt, izmērot sitienu frekvenci (kas, mainoties signālu frekvenču attiecībai, protams, mainās), bet tad nepieciešama ļoti augsta mērījumu precizitāte.

Balstoties uz šo brīnišķīgo dzirdes īpatnību, cilvēks, kas absolūto skaņas augstumu spēj noteikt tikai ar ≈ 0.2 % precizitāti (arī cilvēki ar absolūto dzirdi), relatīvo skaņas augstumu spēj noteikt ar ≈ 0.0001 % lielu precizitāti. Lai to panāktu, nepieciešams tikai uzmanīgi ieklausīties un sajūst sitienus. Jāpiebilst, ka reāliem skaņu avotiem, kas parasti nav harmoniski, sitieni nav pārāk uzkrītoši - modulācijas stiprums - $\frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max}}$ parasti nepārsniedz 30 % (t.i. relatīvā skaļuma maiņa nav lielāka par 30 %).

Šādus sitienus veido arī neprecīza kvinta (frekvenču attiecība $\approx 3:2$), piemēram temperēta kvinta. Ja mēs uzskaņojam kvintu, lai tās sitienu frekvence veidotu tieši pusi no temperētās kvintas frekvences atšķirības attiecībā pret tīru kvintu, mēs iegūsim temperēto kvintu. No 3.tabulas mēs varam noteikt, ka pirmajā oktāvā do-sol temperētās kvintas kļūda attiecībā pret tīru kvintu ir ≈ 4 Hz, tas nozīmē, ka tā veidos sitienus ar frekvenci ≈ 2 Hz (2 reizes sekundē). To ieklausoties spēj pamanīt gandrīz jebkurš cilvēks. Apskatot šādus akustiskos intervālus arvien augstāk un augstāk, absolūtā kļūda starp tīro kvintu un temperēto kļūst arvien lielāka (jo palielinās toņu frekvence), un līdz ar to palielinās arī sitienu frekvence. Ja mēs ieklausītos labi uzskaņotu klavieru kvintās, tad braucot pa klaviatūru uz augšu, pamanīsim, ka sitieni vienmērīgi kļūst arvien ātrāki (to frekvence vienmērīgi palielinās). Vienmērīga sitienu paātrināšanās ir vienmērīgi temperētas gammās testēšanas paņēmiens.

Līdz šai vietai mēs aplūkojām taustiņinstrumentu uzskaņošanas vienkāršotu variantu - uzskatot, ka nospiežot attiecīgo taustiņu atskan tīra sinusoīda. Parasti tas notiek stipri sarežģītāk, jo praktiski visi instrumenti rada gan periodiskas, bet ne tīri sinusoidālas svārstības. Tālāk mums jāņem vērā arī šis svarīgais faktors.

2.2. Gammas iegūšana, ja skaņas avoti nav harmoniski

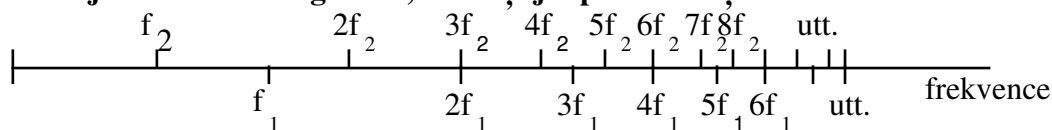
Iepriekšējā nodaļā tika aplūkots, kā temperētā gamma tiek iegūta, ja skaņas avoti ir harmoniski - sinusoidāli. Reāli neviena instrumenta skaņa nav absolūti harmoniska, tātad tajā ir arī virstoņi, tāpēc uzskaņošana ar sitienu metodi kļūst sarežģītāka.

Ja mēs uzskaņojam kādu mūzikas instrumentu (precīzāk - taustiņinstrumentu), tad tā sarežģītā skaņas spektra (frekvenču spektra) dēļ, skaņas sitieni kā kopējā skaņas skaļuma maiņa necik spilgti neparādās. Tas padara grūtāku tā uzskaņošanu, bet skaņošanas meistari apiet šo problēmu ļoti interesantā veidā - faktiski viņi izmanto to pašu sitienu metodi, tikai nedaudz komplicētākā variantā.

To var pierādīt ar matemātiku un par to var pārliecināties arī praktiski, ka vislielākā sitienu amplitūda veidojas starp signāliem, kuru frekvences ir tuvas attiecībai 1:1 (t.i. tuvu unisonam). Jo signālu frekvenču attiecība ir tālāka no šiem skaitļiem, un jo sarežģītāks ir signālu spektrs, jo to sitienu modulācija (skaņas skaļuma izmaiņa) ir vājāka. Tādēļ visvieglāk arī ir uzskaņot unisonu. Izmantojot signāla virstoņus, kas it kā ir traucējošs faktors, un uzskaņojot tos unisonā, var iegūt jebkuru frekvenču attiecību.

Paraudzīsimies, kā to var īstenot. Lai mēs iegūtu kvintu 1. oktāvā no do uz sol, mums jāpanāk, lai toņu frekvenču attiecība būtu 3:2. Reāliem skaņu avotiem šāds rezultāts tiek panākts, uzskaņojot unisonā pirmā toņa 3. harmoniku (2. virstoņi, kas skan trīsreiz augstāk par pamattoni do), ar otrā toņa 2. harmoniku (1. virstoņi, kas skan divreiz augstāk par pamattoni sol). Ka tādi skaņojot arī tiek iegūta kvinta, var viegli pārliecināties zīmējumā:

11. zīmējums. Kvintas iegūšana, uzskaņojot pēc virstoņiem:



No zīmējuma redzams, ka kvintu mēs varam iegūt, uzskaņojot unisonā arī 6. harmoniku ar 4. harmoniku, vai vēl tālāk uz augšu. Lai tā uzskaņotu instrumentu, ir tikai īpaši jāuztrenē dzirde, lai pamanītu attiecīgās harmonikas. Līdzīgā kārtā var uzskaņot arī citus intervālus, izvēloties citas harmonikas.

Lai kādu no šādi iegūtiem intervāliem temperētu, nepieciešams tikai, lai attiecīgās harmonikas neskanētu precīzā unisonā, bet ar noteiktu sitienu frekvenci. Pie tam šādi skaņojot jebkuru intervālu, mēs ieklausāmies tieši tajos sitienos, kas ir tuvu unisonam, tātad arī visjūtamākie. Šādā veidā tiek izmantotas, parastā veidā skaņojot, traucējošās instrumenta harmonikas [6,64.lpp.].

Aprakstītā metode ir ļoti efektīva un viegli kontrolējama (nepieciešams vienīgi speciāli uztrenēt dzirdi), bet tā noved pie ļoti interesantas problēmas, ko akustiķi

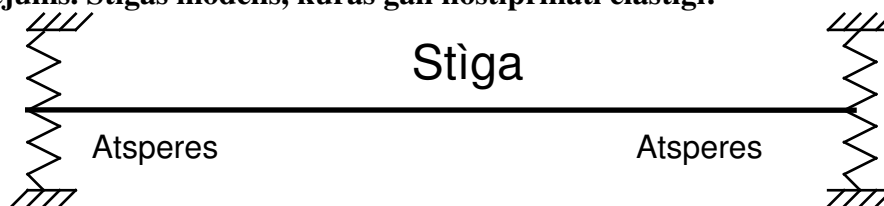
pārāk ilgi negribēja atzīt: vai, piemēram, tīra oktāva ir tāda, kuras pamattoņu frekvenču attiecība ir 2:1, vai tāda, kur viena pamattoņa otrā harmonika skan unisonā ar otru pamattoni? Lielais vairums fiziķu atbildēs, ka jautājumam nav jēgas, jo tas ir viens un tas pats, bet ne visai sen (trīsdesmitajos gados) atklājās, ka tas tā nav [6,85.lpp.]. (Diemžēl plašā sabiedrībā tas vēl joprojām nav saprasts.)

Ja mēs uzskatām, ka, piemēram, klavieru stīgas svārstības aprakstāmas ar ideālas stīgas vienādojumu, tad atrisinot diferenciālvienādojumu, iegūst, ka stīgas harmonikas ir precīzi pamatsvārstību daudzkārtņi. Vairumam izpratne stīgas svārstībās aprobežojas ar šo modeli. Patiesībā (vismaz tuvāk tai) šis modelis ir ļoti neprecīzs un apmierinošs tikai kvalitatīvai, nevis kvantitatīvai stīgas svārstību analīzei. Šāds modelis nespēj izskaidrot to, ka divas stīgas unisonā vienmēr skan skaļāk par vienu, teorētiski taču iespējams panākt, ka viena stīga "dzēš" otru (t.i. tās svārstās pretfāzē), un kopā tās skan klusāk. Lai izskaidrotu šādu stīgu savstarpējo sinhronizāciju, mums stīgas svārstības būtu jāapraksta kā nelineāras, bet pie patreizējās jautājuma nostādnes tik sarežģītu modeli nelietosim.

Viens no skaidrojumiem, kā rezultātā stīgas harmonikas neveidojas kā precīzi pamatsvārstību daudzkārtņi, ir tas, ka stīgu galos nevar nostiprināt absolūti nekustīgi. Tas nozīmē, ka arī stīgas gali nedaudz kustās, un stīgas svārstību efektīvais garums kļūst nedaudz lielāks nekā absolūti nekustīgā iekarē. Pie tam šis efektīvais garums ir atkarīgs no svārstību frekvences.

Izmantosim jau izveidotu modeli [7,245.lpp], kurā tiek izmantota ideāla stīga, tikai ar to atšķirību, ka tās gali nav nostiprināti absolūti nekustīgi, bet gan elastīgi (t.i. stīgas gali nostiprināti atsperēs).

12.zīmējums. Stīgas modelis, kuras gali nostiprināti elastīgi:



Ja uzskatām, ka stīga ir ķermenis ar bezgalīgi mazu lieces un spiedes pretestību, un tās sastiepuma spēks $T(x)$ ir laikā nemainīgs, un tas nav atkarīgs no stīgas šķērsvārstībām $v = v(x, t)$ tad diferenciālvienādojums, kas apraksta šādu procesu ir šāds:

$$\rho F \frac{\delta^2 v}{\delta t^2} + \beta \frac{\delta v}{\delta t} - \frac{\delta}{\delta x} T \frac{\delta v}{\delta x} = q(x, t)$$

sākuma nosacījumi $v(x_0, 0) = v_0, \frac{\delta v}{\delta t} = 0$

robežnosacījumi $T(0) \frac{\delta v(0, t)}{\delta x} = -c v, T(L) \frac{\delta v(L, t)}{\delta x} = -c v$

ρ – stīgas blīvums

$\beta \frac{\delta v}{\delta t}$ – berzes spēks (proporcionāls novirzei v),

$q(x, t)$ – ārējais spriegums

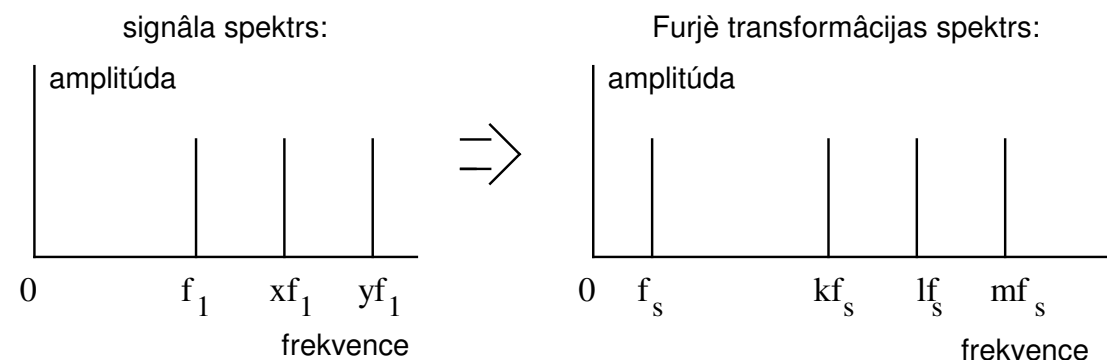
c – atsperes stinguma koeficients

Atrisinot šādu DV, iegūstam svarīgu rezultātu - stīgas virstoņu svārstības vairs nav precīzi pamatsvārstību daudzkārtņi (tie ir nedadz paaugstināti). Rezultātā stīga veido sitienus pati ar sevi (t.i. - ar saviem virstoņiem), un veidojas atšķirība starp intervālu definējumiem akustiķu teorētiķu (ka tā ir toņu frekvenču attiecība) un praktiķu (ka tos nosaka panākot unisonu starp nepieciešamajiem virstoņiem) jomā.

Interesanta ir problēma par signāļa Furjē analīzi (līdzīgu transformāciju veic arī mūsu dzirdes aparāts) - tā definē, ka jebkurš periodisks signāls ir izsakāms kā harmonisku svārstību precīza daudzkārtņu summa. Kā tad ar Furjē rindu var aprakstīt tādu stīgu, kuras virstoņi nav precīzi pamattoņa daudzkārtņi? Neatrisnāms šāds jautājums šķiet tikai pirmajā brīdī.

Lai mēs kādu signālu varētu izvērst Furjē rindā, mums jāatrod tā maksimālais periods - bet mūsu gadījumā tas nebūt nav pamatsvārstību periods (lai cik tas pirmajā brīdī nešķistu dīvaini), bet gan stīgas sitienu periods, kādus tāveido pati ar sevi. Ja izvēršam Furjē rindā tādu signālu, kādu veido mūsu aprakstītā stīga, tad mēs iegūstam, ka visi stīgas virstoņi tik tiešām ir precīzi daudzkārtņi, tikai - nevis tās pamatsvārstībām, bet gan - tās sitieniem.

13.zīmējums. Signāla, kura virstoņi nav precīzi pamattoņa daudzkārtņi, izvēršana Furjē rindā:



f_1 – signāla pamattoāda frekvence

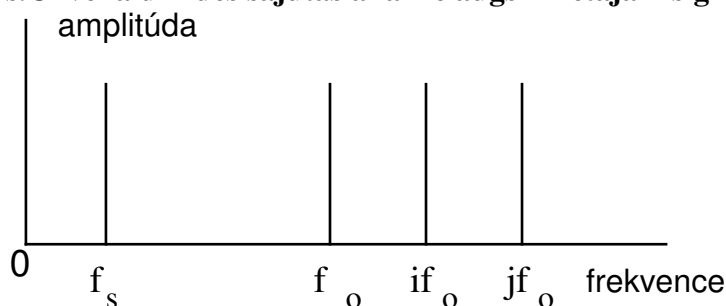
f_s – sitienu frekvence,

x, y – reāli skaitīi, tuvi veseliem skaitīiem,

k, l, m – veseli skaitīi.

Tā kā cilvēks ļoti zemas frekvences nespēj uztvert (viņš to sajūt kā amplitūdas - tātad skaļuma maiņu), tad viņa dzirdes aparāts izdara mums jau pazīstamo transformāciju no signālu summas uz to reizinājumu pie tam, kā jau norādījām, virstoņu attiecības uztver kā precīzas, jo tik mazu augstuma neprecizitāti neatšķir:

13.1.zīmējums. Cilvēka dzirdes sajūtas analīze augšminētajam signālam:



i, j - veseli skaitīi.

Tā kā taustiņinstrumentus (klavieres, ērģeles, u.c.) vēl arvien uzskāņo ar sitienu metodi, tad patiesībā tīro intervālu - oktāvu frekvenču attiecība ir nevis 2:1, bet $\approx 2.001:1$, t.i. - pārvēršot centos - paaugstināta par ≈ 3 centiem (izkliede atkarīga no instrumenta kvalitātes u.c. īpašībām). Temperētās kvintas šī efekta rezultātā tiek paaugstinātas par ≈ 2 centiem. Tas trīsdesmitajos gados, kad O.Leisbeks [6,89.lpp.] veica pirmos precīzos instrumentu uzskāņošanas mērījumus, noveda pie nepareiza un ļoti ilgstoša skaņošanas tehnikas skaidrojuma. Tā kā temperētā kvinta ir pazemināta pret akustiski tīru kvintu par ≈ 2 centiem, tad, virstoņu paaugstināšanās dēļ, to atkal paaugstina par aptuveni tik pat centiem, un tā pēc pemattoņu attiecības kļūst par praktiski precīzi tīru akustisko kvintu. Rezultātā teorētīki (arī O.Reisbeks) paziņoja, ka lai arī praktīki deklarē, ka viņi skaņo instrumentus pa temperētām kvintām, patiesībā, nezināmu iemeslu dēļ, izmanto akustiski tīras kvintas. Stipri vēlāk (vēl pavisam jaunās grāmatās [piem. 6] autori uzskata par vajadzīgu to atgādināt) noskaidrojās teorētīku un praktīku atšķirīgie uzskati tīru intervālu izpratnē, un domstarpības izzuda.

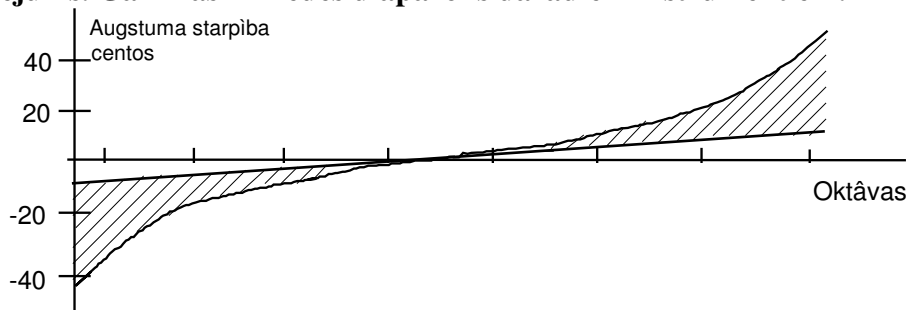
Tagad visi ir samierinājušies ar domu, ka reālu instrumentu gamma ir nedaudz "izstiepta" (augšējais diapazons paaugstināts, apakšējais -pazemināts) attiecībā pret teorētisko gammu, un kļūdas nav tikai vienā punktā, no kura ir sākta skaņošana.

14.zīmējums. Instrumentu gammas (kas iegūta ar sitienu metodi) kļūda attiecībā pret teorētisko gammu, kas veidojas virstoņu paaugstināšanās rezultātā [pēc6,87.lpp.]:



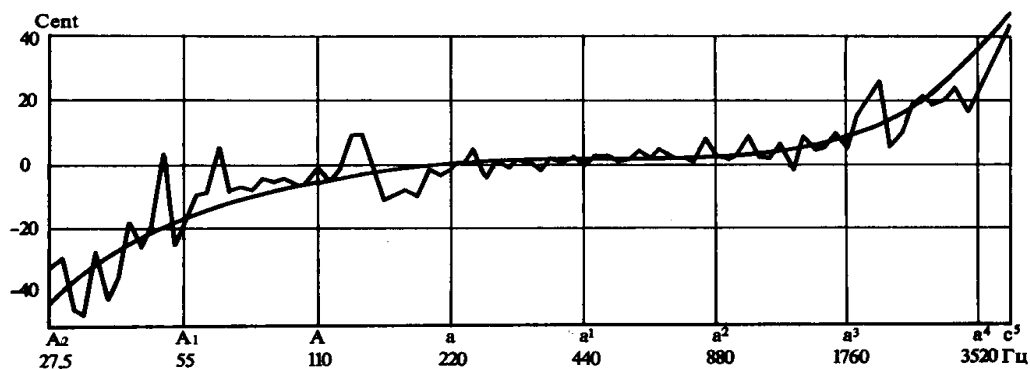
Tā kā visi virstoņi netiek paaugstināti proporcionāli (visvairāk tiek kropļoti tieši pirmie, jeb zemākie), tas rada vēl papildu problēmas. Lai panāktu lielāku skaņošanas precizitāti, skaņotāji ieklausās arvien augstākos virstoņos (tiem sītienu frekvence ir lielāka, tātad - vieglāk pamanāma), lai arī tie skan arvien klusāk. Tā kā dažādi skaņotāji apstājas pie dažādiem virstoņiem, tad arī iegūtie intervāli ir dažādi. Pie tam, tā kā dažādiem instrumentiem virstoņu kropļojumi ir dažādi (labākiem - mazāki, sliktākiem - lielāki), veidojas vēl papildus dažādas izkliedes.

15.zīmējums. Gammas izkliedes diapazons dažādiem instrumentiem:



Un vēl. Tehnoloģisku nepilnību dēļ gadās, ka stīga visā garumā nav homogēna (klavierem stīgas stinguma koeficienta maiņa, ģitārām - stīgu nodilums pret ladām utt.). Var gadīties tā, ka augstākās harmonijās stīga labprātāk dalās navis precīzās trijās daļās, bet gan neprecīzās. Tas rada virstoņu frekvences papildu kropļojumus uz vienu vai otru pusi (tie kļūst augstāki vai zemāki atkarībā no tā, vai stīgas neprecīzā daļa ir saīsināta vai pagarināta). Šiem kropļojumiem piemīt gadījuma raksturs, un tie ir jūtāmāki augstākajiem virstoņiem, tamdēļ skaņotāji pārāk neaizraujas ar uzskaņošanu pēc augstajiem virstoņiem. Taču dažādi skaņotāji rīkojas dažādi (ir vilinājums panākt lielāku precizitāti pēc augstākiem virstoņiem, bet pieaug gadījumkļūdas iespēja). Pie tam katrs cenšas citādi notušēt klavieru skanējuma defektus. Rezultātā reālu klavieru gamma ir stipri savādāka nekā teorētiskā temperētā gamma:

17.zīmējums.Reālu klavieru gammas atšķirības no teorētiskās temperētās gammas [pēc 6,87.lpp.]:



Kā labi rdzams, reāla instrumenta gamma ir ievērojami atšķirīga no teorētiskās gammas, bet šīs novirzes diktē tikai fizikālas dabas procesi vai tehniskas nepilnības. Vēl stipri ievērojamas novirzes no teorētiskās vienmērīgi temperētās gammas izsauc "cilvēka fizika" un viņa dzirdes īpatnības. Bet par to nākošajā nodaļā.

3.Nodaļa

Cilvēka dzirdes izsauktās korekcijas

3.1.Īss cilvēka dzirdes aparāta apraksts

Neiedziļinoties tīri tehniskās detaļās, aplūkosim tikai tās cilvēka dzirdes aparāta daļas (turpmāk šo aparātu sauksim vienkārši par ausi), kas ienes korekcijas mūsu aplūkotajās problēmās.

Skaņas viļņi, kas nāk no skaņas avota, vispirms nonāk t.s. auss skrimslī, jeb ārējā ausī, kas darbojas kā lokators ar nelielu virziendarbību. No ārējās auss skaņas viļņi tiek novadīti uz bungādiņu - plānu ovālu plēvīti, kas atdala ārējo ausi no vidusauss. Bungādiņas svārstības ar sarežģīta sviras mehānisma palīdzību - laktiņu, veserīti un kāpslīti - tiek novadītas uz iekšējo ausi - uz auss gliemeža logu. Auss gliemezī atrodas ūdeņains šķidrums, kas apskalo galveno membrānu, aiz kuras atrodas dzirdes nerva sazarojumi, kuru skaits ir ≈ 20000 . Katrs dzirdes nervs ir savienots ar vienu no nelielām lapiņām, kuras rezonē katra ar savu frekvenci. No dzirdes nerva šīs ierosas nonāk smadzenēs. Kā signāla apstrāde notiek smadzenēs, vēl joprojām ne tuvu nav skaidrs.

Cilvēka auss mehānika visumā ir daudz sarežģītāka par tehnikā izmantojama skaņas uztvērēja - mikrofona uzbūvi. Tas, protams nelabvēlīgi, nosaka arī visa dzirdes aparāta drošumu un precizitāti, lai arī, kopumā ņemot, tam piemīt daudz labu un apbrīnas vērtu īpašību. Galvenās no tām zemāk tiks aplūkotas.

Dzirdamo frekvenču diapazons ir ierobežots. Labākajā gadījumā auss uztver tās akustiskās svārstības, kuru frekvence ir robežās no 20 līdz 20000 herciem (Hz). Šādas svārstības arī pieņemts saukt par skaņu. Vēl zemāko frekvenču diapazonu sauc par infraskaņu, augstāko - par ultraskaņu. Reāli nosakot dzirdes frekvenču diapazonu, precīzi novilkt tā robežas ir grūti, jo dzirdes sajūta, pakāpeniski palielinoties vai pazeminoties frekvencei neizzūd uzreiz, bet pakāpeniski. Pie tam veciem cilvēkiem it sevišķi, ja to dzirdei jāiztur lielas pārslodzes, šis diapazons lielā mērā sašaurinās uz augstāko frekvenču rēķina. Līdz ar to tipiskais dzirdamo frekvenču diapazons ir $\approx 30 \div 16000$ Hz.

Pēc aptuvenā dzirdes nervu skaita un dzirdamo frekvenču diapazona var novērtēt maksimālo absolūto skaņas augstuma izšķirtspēju, uzskatot, ka neviens no dzirdes nerviem nedublējas:

$$\frac{1200 \frac{\text{centi}}{\text{oktāva}} \cdot 10 \text{ oktāvas}}{20000 \text{ nervi}} = 0.6 \text{ centi}$$

Praktiski absolūtā skaņas augstuma izšķirtspēja ir stipri zemāka, proti, 100÷200 centi (t.i. 1÷2 temperētie pustoņi!)[10,100.lpp.]. Pie tam skaņām, kuru augstums ir virs 14000 Hz, cilvēks skaņas augstumu vispār vairs nevar noteikt -visām augstākām skaņām veidojas vienāda dzirdes sajūta [9,143.lpp.]. Vislielākā absolūtā

skaņas augstuma izšķirtspēja cilvēkam ir $\approx 1\text{kHz}$ diapazonā, un augstākām vai zemākām skaņām tā kļūst arvien sliktāka.

Dzirdes dinamiskais diapazons ir intervāls starp visskaļāko un visklusāko skaņu, ko cilvēks spēj uztvert. Lai aprakstītu cilvēka dzirdes skaļuma izjūtas, izmanto t.s. Vēbera -Fehnera likumu: dzirdes sajūtu izmaiņa ir proporcionāla skaņas stipruma logaritma izmaiņai.

$$L = \lg \frac{I}{I_0} [\text{belos}] = 10 \lg \frac{I}{I_0} [\text{decibelos}]$$

L – skaņums [belos vai decibelos], 1 bels = 10 decibeli,

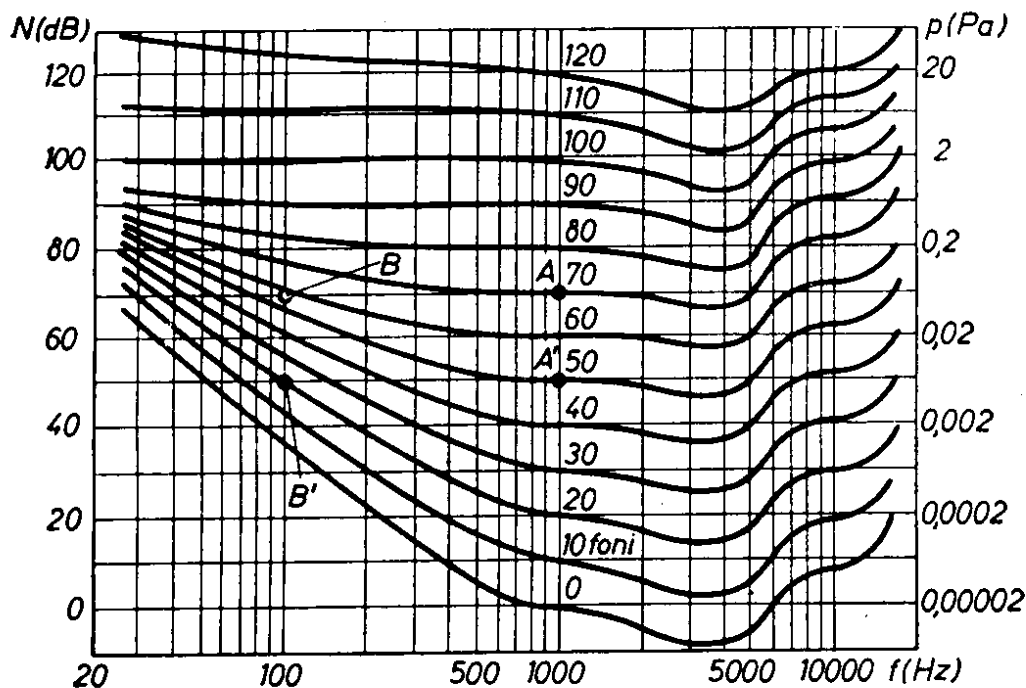
I – dotā signāla skaņas stiprums $\frac{W}{m^2}$, W – skaņas jauda vatos

I_0 – atbalstsigaņas skaņas stiprums $\frac{W}{m^2}$, m^2 – virsmas laukums kvadrātmetros

Maksimālais dzirdes dinamiskais diapazons ir ≈ 120 decibeli, tas nozīmē, ka klusākā skaņa, ko cilvēks var sadzirdēt ir par 12 (!) kārtām vājāka nekā visskaļākā skaņa, ko tas spēj izturēt. Dinamiskā diapazona jomā cilvēka auss vēl arvien ir tehnikas nepārspēta. Ņemot vērā dzirdes dinamiskā diapazona atkarību no signāla frekvences, ir ieviestas arī citas mērvienības, kas raksturo dzirdes sajūtu -piemēram t.s.skaļuma līmenis, ko mēra fonos. Skaļuma līmeni nosaka subjektīvi, salīdzinot dotās skaņas skaļumu ar 1000 Hz sinusoidāla signāla skaļumu. Par sāpju sliekšni (skaļākā skaņa, ko cilvēks spēj paciest) uzskata 120 fonu līmeni, par dzirdamības sliekšni - 4 fonu līmeni. Tā kā dzirdes dinamiskā diapazona platums ir atkarīgs no frekvences, tad signāliem, kuru frekvence ir lielāka vai mazāka par 1kHz, skaļums decibelos un skaļuma līmenis fonos atšķiras. Šī sakarība parasti tiek attēlota grafiski:

19.zīmējums. Dzirdes dinamiskā diapazona atkarība no frekvences

[pēc 3,24.lpp.]:



Prakse rāda, ka pastāv arī t.s. maskēšanās efekts - vājāka skaņas signāla subjektīva pazušana (maskēšanās) stiprāka skaņas signāla (maskējošā signāla) ietekmē. Maskēšana ir spēcīgāk izteikta tad, ja maskējošais signāls ir ar mazāku frekvenci (zemāks) par maskējamo signālu. Vispilgtāk šis efekts izpaužas signāla virstoņu neievērošanā, jo virstoņi tiek maskēti ar pamattoni. Maskēšanās efekta dēļ, daudz balsīgā skaņdarbā augstākajām balsīm, lai tās varētu sadzirdēt, jāskan skaļāk par par zemākajām. Interesanti, ka dzirdi var speciāli uztrenēt, lai tā šo efektu apietu - to dara mūziķi un instrumentu skaņotāji, lai sadzirdētu instrumenta virstoņus. Tas, ka šo efektu var apiet mācību ceļā, norāda, ka tas ir tikai smadzeņu darbības, nevis ausu "mehānisma" darbības sekas. Bet ir efekti, kas ir atkarīgi tieši no ausu mehānikas kvalitātes.

Noskaidrots, ka cilvēka ausī veidojas nelineāras svārstības, tas ir, ausī, uz kuru iedarbojas tikai divas uzspiedējsvārstības (ārējās skaņas) f_1 un f_2 , veidojas arī t.s. kombinācijsvārstības $f_{kom} = nf_1 \pm mf_2$, kur n un m nelieli veseli skaitļi. Rezultātā cilvēka ausī rodas svārstības (un līdz ar to arī skaņas sajūtas), kuru apkārtējā dabā nemaz nav, bet kuras veidojas no apkārtējo skaņu frekvenču kombinācijas.

To var izskaidrot, uzskatot, ka dažām auss mehānismu daļām piemīt nesimetrisks elastīgums. Nesimetrisks elastīgums parādās bungādiņai un auss gliemeža logam, jo to virsmas ir nevis plakanas, bet gan liektas. Tā rezultātā vienā virzienā tos deformējot tie tiek nedaudz spiesti, bet otrā - stiepti. Praktiski nevienam materiālam (arī auss bungādiņai un gliemeža logam) pretestība pret spiedi un stiepi nav vienāda, tātad vienādi spēki, kas uz tiem iedarbojas dažādos virzienos, rada

dažādas deformācijas. Tuvināti to elastību var aprakstīt ar otrās pakāpes polinomu, kurā tiek ņemta vērā elastības spēka izmaiņa atkarībā no deformācijas virziena.

$$F_{el} = -k_1x \pm k_2x^2 \text{ kur}$$

F_{el} – elastības spēks

k_1 – lineārās elastības koeficients

k_2 – nelineārās (kvadrātiskās) elastības koeficients

x – novirze no līdzsvara stāvokļa

Pie tam nelineāru svārstību veidošanos rada arī dažu auss mehānismu brīvgaite (tie ir veserītis, laktiņa un kāpslītis).

Izmantojot kombinācijfrekvences, cilvēka uztvere spēj "restaurēt" skaņas, kuras tiešā veidā sajust nevar. Tā pēc virstoņu kombinācijām cilvēks var sadzirdēt subkontroktāvas do, kura frekvence ir tikai 16 Hz, lai gan zemākā harmonisku signālu dzirdes robeža ir 20÷30 Hz.

Visbeidzot, jāņem vērā, ka līdzīgi kā redzei, arī dzirdei patiesībā cilvēks tikai vienu desmitdaļu dzird ar ausīm, bet deviņas desmitdaļas - ar smadzenēm. Tas nozīmē, ka ļoti svarīga loma ir arī cilvēka augstākās smadzeņu darbības rezultātam - gaumei, noskaņojumam un daudz kam citam.

3.2. Novirzes no teorētiskās vienmērīgi temperētās gammas, saskaņā ar cilvēka psihofizioloģiskajām prasībām

Jau sākumā jānorāda, ka tālākā pārspriedumā apskatītais vairāk tiks attiecināts uz mūzikas izpildītājiem, kas nav atkarīgi no fiksētas un iepriekš stingri noteiktas gammas (kā taustiņinstrumentālisti) -t.i. uz vokālistiem, bezladu stīgu instrumentu un pūšaminstrumentu solistiem. Vislielākā brīvības pakāpe atkāpēs no temperētās gammas, protams, ir vokālistiem, bet mūziķus -instrumentālistus vairāk vai mazāk ierobežo viņu izmantotais instruments.

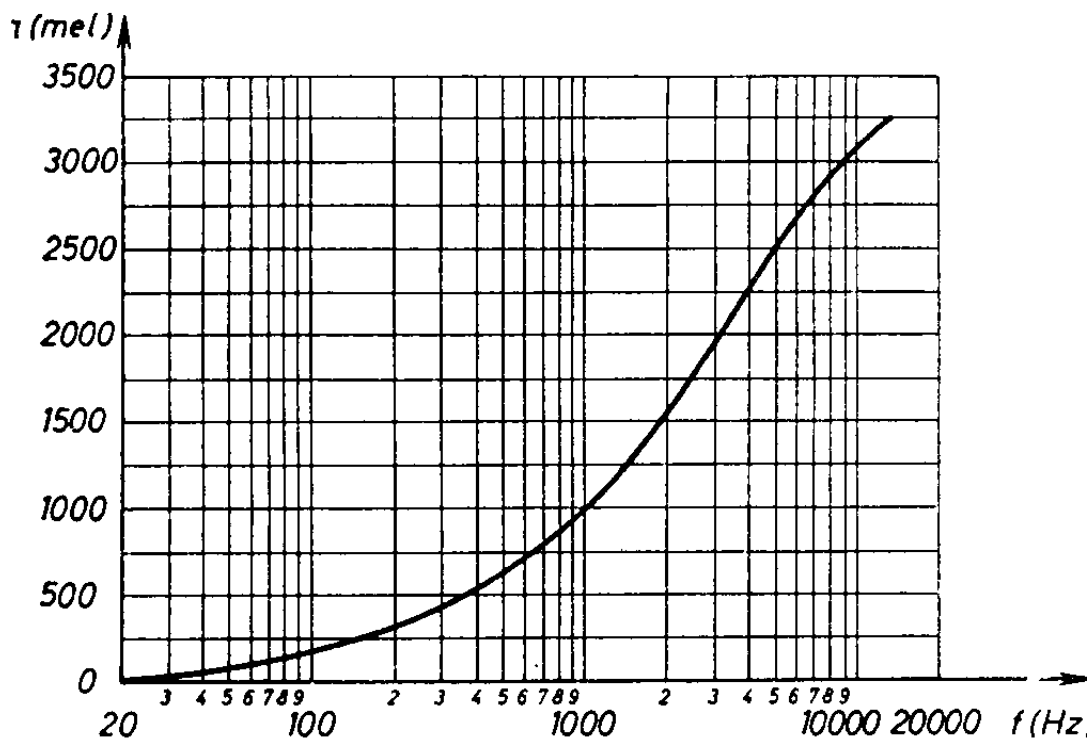
Ņemot vērā to, ka vienmērīgi temperētajā gammā vienīgi akustiski tīrie intervāli ir oktāvas, no akordu "tīrības" viedokļa raugoties, tā ir vissliktākā gamma. Visiem citiem akustiskajiem intervāliem - kvintām, kvartām, tercām utt., kas, piemēram, diatoniskajā gammā skan tīri, temperētajā gammā ir lielākas vai mazākas neprecizitātes. Tamdēļ dažkārt, cenšoties panākt lielāku atskaņojuma dzidrumu un tīrību, korī vai simfoniskajā orķestrī (t.i. ansambļos, kas parasti nav "piesieti" pie fiksētas gammas), mēdz izmantot tīrus akustiskos intervālus, kas temperētajā gammā tādi nav. Pie tam, tā kā temperētā gamma instrumentiem tiek iegūta gara un sarežģīta uzskatīšanas procesa rezultātā, tad viegli saprotams, ka koris, vai parasts mirstīgs solists fiziski nav spējīgi nodziedāt precīzu temperēto kvintu, kvartu, vai kādu citu temperēto intervālu. Tas nozīmē, ka koru mūzikā faktiski vēl arvien izmanto diatonisko vai hromatisko gammu [10,79.lpp.]. Līdzīgā stāvoklī atrodas arī

simfoniskā orķestra mūziķi, jo lielais vairums instrumentu tajā ir būvēti uz dabīgās skaņurindas bāzes, līdz ar to temperētos intervālus tajā iespējams iegūt tikai ar noteiktu precizitāti, un arī tad tikai speciāli papūloties. Stāvoklis mainās, ja korī vai orķestrī tiek iekļauti instrumenti ar fiksētu skaņurindu (kura šādos gadījumos gandrīz vienmēr ir, cik jau nu iespējams, vienmērīgi temperēta). Aprakstītajā situācijā visi pārējie pakļaujas šim instrumentam, un tad jau gammās precizitāti nosaka šī instrumenta parametri.

Tā kā maskēšanās efekta dēļ zemākās balsis "aizēno" augstākās, tad augstākajām balsīm ir jāskan skaļāk par zemākajām. Diemžēl šis risinājums ne vienmēr ir iespējams instrumentos ar fiksētu gammu (taustiņinstrumenti, arfa uc.). Šeit ir izdomāts cits risinājums, ko nespēj realizēt mūziķi, bet spēj veikt skaņotāji - oktāva instrumentā tiek pavisam nedaudz paplašināta (parasti katra nākamā par ≈ 0.1 centu). Rezultātā augstākā skaņa ar saviem virstoņiem vairs precīzi nesakrīt ar zemākās skaņas virstoņiem un līdz ar to "iegūst savu balsi" t.i. izdalās uz zemāko skaņu fona [6,93.lpp.]. Kāpēc līdzīgu efektu necenšas panākt uz intervālu sašaurināšanas rēķina, mēģināsim izskaidrot tālāk.

Dažkārt skaņa augšējās oktāvās tiek paaugstināta daudz ievērojamāk - pat par vairākiem centiem. Parasti to dara instrumentiem, kuru skaņas spektrs atrodas ļoti augstās oktāvās - zvaniņiem u.c. tāda veida instrumentiem. Tik lielu skaņas paaugstināšanu vairs nevar izskaidrot ar maskēšanas efektu, tāpēc tur ņem talkā citu izskaidrojumu. Cilvēka dzirdes īpatnību dēļ veidojas divi atšķirīgi "mehānismi", kas noved pie līdzīgam sekām -pie akustisko intervālu diezgan vērā ņemamas paplašināšanas. Viens no tiem ir tas, ka cilvēka dzirdes izšķirtspēja samazinās, skaņas frekvencei tuvojoties augšējam vai apakšējam dzirdamības sliekšnim. Lai panāktu līdzīgu absolūtā skaņas augstuma subjektīvo izmaiņu, skaņas intervālu frekvenču attiecība frekvenču joslas vidusposmā ir jāizmaina mazāk, nekā malās.

20.zīmējums. Sakarība starp skaņas melodisko un harmonisko augstumu [pēc 3,30.lpp.]:

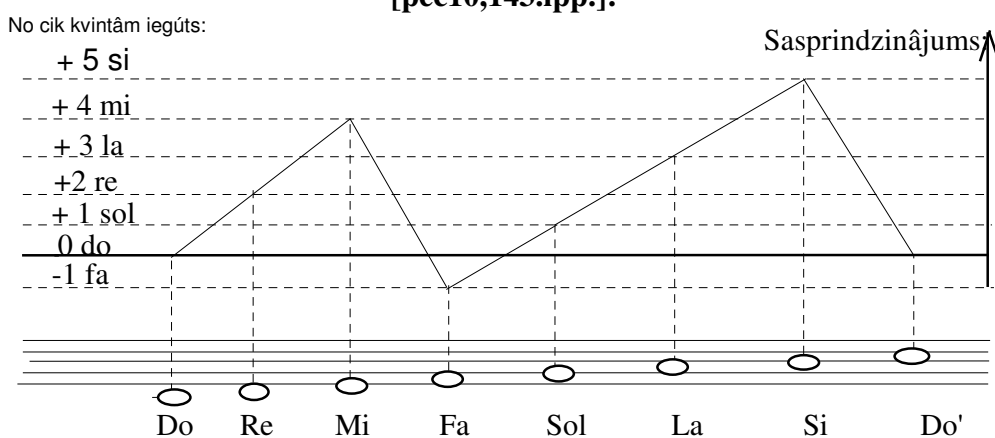


Otrs "mehānisms" veidojas uz cilvēka neapmierināto prasību pēc skaņas melodiskās struktūras rēķina. Kā jau tika pieminēts, kvinta cilvēkam šķiet otrs svarīgākais akustiskais intervāls aiz oktāvas. Jau tika norādīts, ka skaņas melodiskajā virzībā, cilvēkam dabiskāka šķiet Pitagora terca, kas ir atvasināta no kvintām. Tikai akordā skanot šī terca šķiet neīsta (tai veidojas nepatīkama sitienu frekvence), un tādēļ vēlāk to nomainīja ar dabīgo tercu, kas ir akustiski tīrs intervāls un tātad bez sitieniem. Temperētajā gammā Pitagora terca (408 centi) tiek aizstāta ar temperēto tercu (400 centi), līdz ar to atskaņojot melodiju temperētajā gammā, cilvēka dzirdes prasības pēc nedaudz lielākās melodiskās tercās netiek apmierinātas, un melodiskā skanējumā, intervāliem kombinējoties, temperētā gamma šķiet nedaudz par šauru. Lai šo prasību apmierinātu, solisti, kas nav atkarīgi no fiksētas gammā, kompensē to automātiski, saskaņā ar savu gaumi, bet instrumentos ar fiksētu gammu dažkārt mēdz papildus paplašināt visus akustiskos intervālus.

Jau iepriekš tika norādīts (skat.aprakstu par diatonisko un Pitagora gammu 8.lpp.), ka dažādās gammās atskaņots viens un tas pats skaņdarbs skan dažādi izteiksmīgi. Atšķirīgā skanējuma cēlonis slēpjas dažādajās funkcionālajās saitēs starp gammā skaņām. Diatoniskajai gammā, kas pēc Pitagora kvintu metodes tiek paplašināta līdz hromatiskajai gammā, piemīt daudz tādu īpašību, kas mūsdienu vienmērīgi temperētajā gammā ir nonivelētas. Hromatiskajā gammā ir labi pamanāmas t.s. noturīgās un noturīgās skaņas, pie tam skaņdarba mūzikālā attīstība

parasti tiek virzīta tā, ka nenoturīgās skaņas tiecas pāriet noturīgajās. Daži autori uzskata [piem.10], ka noturīgās un nenoturīgās skaņas veidojas no augšup- un lejupejošām kvintām. Runājot stāstījuma teikumā cilvēks esot pieradis nobeigt sakāmo kvintu zemāk nekā sākumā, tādējādi veidojot atslābumu, bet jautājuma teikumu nobeidz kvintu augstāk nekā sākumu, veidojot sasprindzinājumu. Līdzīgi melodijai kustoties pa kvintām uz augšu, sasprindzinājums arvien vairāk pieaug, bet kustoties pa kvintām uz leju arvien vairāk atslābinās. (Šis skaidrojums labi sasauca ar izplatītu paņēmieni modulēt kādu skaņdarba daļu, par kvintu uz augšu, lai kāpinātu sasprindzinājumu un modulēt uz leju, lai to mazinātu.) Gammās iegūšana ar Pitagora kvintu metodi ir līdzīga braukšana pa kvintām uz augšu un uz leju, līdz ar to skaņas gammā, kas pastarpināti tiek iegūtas no augšupejošām kvintām ar katru nākamo kvintu kļūst saspriegtākas un nenoturīgākas, bet tās, kas tiek iegūtas no lejupejošām kvintām, mierīgākas un noturīgākas. Rezultātā tiek iegūta sakarība, ka, jo vairāk augšupejošas kvintas jāuzskaņo, lai iegūtu kādu intervālu gammā, jo tas ir nenoturīgāks, jo vairāk lejupejošas, jo noturīgāks. Diatoniskai gammai, ja tā iegūta ar Pitagora kvintu metodi, pēc šīs hipotēzes atgādina zāģi ardiviem kāpumiem. Jāpiebilst, ka hromatisko gammu šāda jauka hipotēze, diemžēl, nespēj pilnībā izskaidrot.

20.zīmējums.Gammās sasprindzinājuma pieauguma shēma [pēc10,143.lpp.]:



Tā kā temperētajā gammā enharmoniskuma dēļ daudzas skaņas, kas skan dažādi hromatiskajā gammā (jo tās ir iegūtas dažādi skaņojot pēc kvintām!), skan vienādi, tad temperētajā gammā šādas noturīgas un nenoturīgas skaņas, kas labi parāda skaņas melodisko virzību, ir daudz neizteiktākas. Pētot vijolnieku spēli, (kas nav atkarīgi no iepriekš fiksētas gammas kā taustiņinstrumentālisti) [10,87.lpp],[8,105.lpp.], atklājās, ka mūziķi apzināti atkāpjas no temperētās gammas, lai labāk atklātu skaņdarba melodisko virzību. Līdz ar to arī vijolnieki spēlē daudz tuvāk Pitagora gammai, nekā temperētajai gammai. Jāpiebilst, ka neviens mūziķis, kas nav "piesiets" pie temperētās gammas, nespēlē arī precīzā Pitagora gammā (pierādīts, ka to izdevīgi ievērot pilnībā tikai dažos vienkāršākos gadījumos

[10,41.lpp.]), kādēļ, ņemot vērā arī Pitagora gammas nepilnības, pagaidām neviens tomēr negrasās pāriet atpakaļ uz Pitagora vai diatonisko gammu.

Šie, protams, ir tikai paši svarīgākie efekti, kas noved pie vienmērīgi temperētās gammas korekcijām (vai neievērošanas). Citus, vēl smalkākus, efektus pagaidām ir ļoti grūti skaidrot, jo tādā gadījumā kļūdas gan mērījumos, gan skaidrojumos ir samērojamas ar pašiem mērāmajiem vai skaidrojamiem lielumiem.

Nobeigums

Te nu mēs esam nonākuši galā, un vajadzētu atskatīties uz to, ko esam panākuši. Panākumi, tiesa, nav milzīgi, bet uz tādiem, domājams, arī neviens nebija cerējis.

Mēs esam aplūkojuši vienmērīgi temperētās gammas izcelsmi un attīstību (vēsturiskās saknes), un to aprakstošos fizikālos modeļus.

Pie kādiem secinājumiem tad esam nonākuši?

Ar jēdzienu vienmērīgi temperētā gamma nedrīkst saprast kādu statistiku, precīzu tās matemātisko modeli, jo tad būs jāatzīst, ka vienmērīgi temperēto gammu kā tādu neizmanto praktiski nekur.

Jāšķiro vienmērīgi temperētās gammas jēdziens instrumentiem ar fiksētu skaņurindu (taustiņinstrumenti, arfa, u.c.) un nefiksētu vai daļēji fiksētu skaņurindu, jo prasības pret tiem, kā izrādās, ir dažādas.

Nozīmīgs ir arī t.s. cilvēka faktors, t.i. jāņem vērā gan cilvēka tīri tehniskās dzirdes īpatnības, gan arī tā psihofizioloģiskās uztveres īpatnības.

No tā izriet visas vienmērīgi temperētās gammas labās un sliktās īpašības, un tās pielietojamības robežas.

Jau savos izcelsmes pirmsākumos vienmērīgi temperētā gamma izveidojās kā universāla sistēma, kā dēļ tai ir daudz labu īpašību, bet konkrētās, speciālās jomās, ir gammas, kuras noteiktas prasības apmierina labāk nekā vienmērīgi temperētā gamma. Līdzīgi ir jomas, kurās vienmērīgi temperētā gamma kā mākslīgi iegūta skaņu sistēma neattaisno tai uzliktās prasības pārlieku lielās sarežģītības dēļ. Pie tam, izejot no cilvēka dzirdes īpašību analīzes, var droši apgalvot, ka cilvēks nevar precīzi pateikt, kādā gammā kāds skaņdarbs tiek spēlēts, un jūtamās atšķirības ir dziļi subjektīvas, līdz ar to neizmērāmas.

Un, visbeidzot, tā kā vienmērīgi temperētā gamma radās kā vislabākais risinājums, kas apmierināja konkrēta laika, konkrētu mūziķu prasības, tad no pieprasījuma un piedāvājuma likuma izriet, ka tagad valdošā vienmērīgi temperētā gamma tiks gāzta no sava troņa, tiklīdz mūziķiem pret gammu veidosies jaunas prasības, un parādīsies kāda cita skaņu sistēma, kas šīs prasības apmierinās labāk. Un no tā brīža sāksies jauna ēra mūzikālās akustikas jomā, jo tad nodarbosies nevis ar vienmērīgās temperācijas problēmām, bet gan pavisam citādām vēl nezināmām lietām.

Literatūras saraksts

1. Еременко К. А. Музыка от ледникового периода до века электроники. Москва, Советский композитор, 1991.- 319-281 lpp.
2. Ludvigs Kārklīņš Mūzikas leksikons. Rīga: Zvaigzne, 1990.- 335 lpp.
3. К. Томариņš Radioelektroakustika. Rīga: Zvaigzne, 1978.- 242 lpp.
4. В. Rolovs Par fiziku un fiziķiem. Rīga: Zinātne, 1989.- 481 lpp.
5. Микросхемы для ЭМИ. Радио. 10' 1992.- 42.lpp.
6. Порвенков В. Г. Акустика и настройка музыкальных инструментов. Москва: Музыка, 1990.- 186 lpp.
7. Василенко Н. В. Теория колебаний. Киев: Вища школа, 1992.- 429 lpp.
8. Шерман Н. С. Формирование равномерно темперированного строя. Москва: Музыка, 1964.- 118 lpp.
9. Аллон С. М.б Максимов Н. И. Музыкальная акустика. Москва: Высшая школа, 1971.- 283 lpp.
10. Переверзев Н. Проблемы музыкального интонирования. Москва: Музыка, 1966.- lpp.

39

Bakalaura darbs izstrādāts
Latvijas Universitātes
Fizikas un matemātikas fakultātes
Eksperimentālās fizikas katedrā

Autors
Fizikas un matemātikas
fakultātes students
stud. apl. Nr. 901161525

V. Vītoļiņš
1994.gada 20.maijā

Darba vadītājs

V. Detlovs
dr. math.

1994. gada ____ . maijā

Darbs iesniegts katedrā

1994. gada ____ . maijā

Darbs aizstāvēts Bakalaura pārbaudījumu komisijas sēdē

1994. gada ____ . jūnijā ar atzīmi ____.

Protokols Nr. _____.

Bakalauru pārbaudījuma komisijas sekretārs _____.