

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
ROMÂNIA**

UNIVERSITATEA DE ARTE "GEORGE ENESCU", IAȘI

TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumat

Sistemele acustice muzicale – trecut și prezent

Conducător științific

Prof. Univ. Dr. Gheorghe Firca

Doctorand

Ion-Cristian Nițu

2007

INTRODUCERE

Muzica i-a preocupat pe oameni din cele mai vechi timpuri, atât ca artă cât și ca știință a sunetelor. Încă din antichitate manifestările muzicale au fost studiate de învățații de pretutindeni, fie ei chinezi, indieni, elini sau arabi. S-a observat că fenomenul muzical nu poate fi definit numai în universul său propriu, fiind necesară o privire dintr-o perspectivă obiectivă, mai largă: se impunea fundamentarea sa pe baze fizice și matematice. În plus față de disciplinele specifice muzicii – având ca obiect studiul compoziției, al esteticii și al interpretării – au fost promovate și altele, pentru a defini aspecte particulare dar foarte importante ale științei muzicii. Cea mai importantă și cu o deschidere foarte cuprinzătoare asupra fenomenelor specifice a fost și a rămas teoria muzicală, care înglobează o paletă largă de aspecte, pornind de la notația grafică și ajungând până la definirea și calculul sistemelor de intonație și acordaj muzical. O altă disciplină, organologia, a pus bazele teoretice și practice ale construcției instrumentelor muzicale. Atât definirea sistemelor de intonație cât și proiectarea instrumentelor muzicale s-au realizat pe baza cunoștințelor de fizică și matematică aplicată.

Teoreticienii din toate timpurile au încercat să determine cu o cât mai mare rigoare regulile de bază ale muzicii, aflate în strânsă legătură cu legile universului. Așa cum arăta Alain Daniélou în *Tratatul de muzicologie comparată*, “relațiile numerice exprimând raporturile sunetelor muzicale au echivalențe cu toate celelalte aspecte ale existenței [...] Se ajunge astfel la concluzia că legile care stăpânesc lumea sonoră nu aparțin numai acestui domeniu ci corespund ritmurilor universului”.

Interesul actual pentru muzica veche determină amplificarea cercetării teoretice a sistemelor acustice muzicale corespunzătoare precum și căutarea de

metode simple de realizare a unor instrumente muzicale acordabile în cât mai multe variante de sisteme acustice muzicale.

S-a observat că producerea sunetelor în natură, pe de o parte și recepția lor de către analizatorii biologici pe de altă parte, sunt definite în mod diferit pe baza unor fenomene și legi specifice. Producerea sunetelor muzicale se bazează pe modurile proprii de vibrație ale corzilor și tuburilor sonore care generează sunete aparținând șirului armonicelor naturale (fenomenul poate fi definit cu ajutorul unei relații matematice simple). Recepția se bazează pe particularitățile organului auditiv, care prezintă o variație liniară a senzației auditive (mărime fiziologică) pentru o variație logaritmică a frecvenței sunetului excitator (mărime fizică).

Deși în domeniul muzical nu putem vorbi numai despre producere sau numai despre recepție a sunetului, cele două fenomene fiind indisolubil legate între ele, dihotomia producere – recepție a sunetului generează o serie de obstacole de ordin practic și implicit, teoretic. Datorită legilor diferite care guvernează producerea și recepția sunetelor, alăturarea celor două fenomene în cadrul teoriei și organologiei muzicale a determinat abordări diferite. S-a căutat fie reprezentarea numerică (prin raporturi matematice) conform construcțiilor teoretice bazate pe emisia sunetului la sursă, realizate pe baza divizării sau a rezonanței naturale (sistemele netemperate), fie exprimarea legilor de producere a sunetelor în termeni fiziologici (prin definirea sistemelor acustice muzicale temperate egal), dar rezultatele au fost nesatisfăcătoare.

Pentru o reproducere cât mai fidelă a sistemelor de intonație și acordaj muzical se impune prezentarea fenomenelor fizice, a unor metode de măsură și a unor aparate de laborator, precum și a mijloacelor moderne de calcul. În paralel cu definirea și teoretizarea acestor sisteme este interesant de urmărit și evoluția instrumentelor muzicale și a mijloacelor de exprimare muzicală.

1. ACUSTICA FIZICĂ

În cadrul capitolului *1. Acustica fizică* sunt prezentate elementele de bază ale capitolului fizicii care se ocupă cu studiul vibrațiilor mediilor elastice și a tuturor aspectelor legate de producerea, propagarea și efectele lor. Domeniul de studiu este însă mai redus în cazul de față, fiind definit în mod foarte strict conform cerințelor specifice științei muzicii, în raport cu tema de cercetare propusă – sistemele acustice muzicale. Pentru a limita domeniul de lucru, sunt studiate vibrațiile care satisfac anumite condiții de frecvență (între 16 și 20.000 Hz), intensitate (peste 10^{-16} W/cm²) și durată (cel puțin $6 \cdot 10^{-2}$ s), producând senzația de sunet.

În cuprinsul capitolului sunt studiate undele elastice, proprietățile fizice ale sunetului, producerea și propagarea undelor acustice.

Subcapitolul *1.1. Undele elastice* prezintă detalii despre mișcarea oscilatorie, undele elastice (longitudinale și transversale), frontul de undă, ecuația undei plane, principiul lui Huygens (cu ajutorul căruia se pot explica fenomenele caracteristice propagării undelor: difracția, umbrirea, reflexia și refracția), interferența (inclusiv apariția undelor staționare și a bățăilor), compunerea oscilațiilor, efectul Doppler-Fizeau (variația frecvenței percepute de un observator față de frecvența proprie a sursei, atunci când observatorul sau sursa sunt în mișcare), oscilațiile de relaxare, analiza Fourier (descompunerea oscilațiilor de orice formă în componente sinusoidale separate), rezonanța (transmiterea de energie către un sistem capabil să oscileze), reacția (principiul prin care receptorul poate să acționeze asupra emițătorului, prin inversare de roluri, obținând dezamortizarea sau amplificarea oscilației inițiale).

Subcapitolul **1.2. Proprietățile fizice ale sunetului** aduce informații suplimentare despre sunet, considerat ca vibrație acustică capabilă să producă o senzație auditivă: definiție și clasificare din punct de vedere al compoziției spectrale (sunet pur, simplu și sunet complex, compus din mai multe oscilații sinusoidale, cu frecvențe diferite, de regulă multipli ai celei mai mici).

Din punct de vedere fizic, un sunet complex se caracterizează prin:

- Frecvența celui mai intens sunet component pur (numărul de perioade în unitatea de timp; se măsoară în Hertzi sau cicli pe secundă);
- Intensitatea (cantitatea de energie care străbate, într-o secundă, o suprafață de 1 m^2 , perpendiculară pe direcția de propagare);
- Componenta spectrală (determinată de numărul, ordinul și amplitudinea armonicilor care compun un sunet complex);
- Durata (timpul cât oscilația se produce);
- Regimul tranzitoriu (perioada de trecere de la starea de repaus la cea de oscilație permanentă sau invers, de la oscilația întreținută la starea de repaus).

Subcapitolul **1.3. Producerea undelor acustice** prezintă în mod detaliat emițătorii acustici elementari (tuburile, coardele, barele, membranele și plăcile), mecanici (diapazoanele, sirenele, fluierile, generatoarele cu aer), electromecanici (difuzoarele, generatorii piezoelectrici și magnetostrictivi) și termici (termofonul, arcul electric și scânteia electrică). Cel mai interesant tip de emițător acustic este, fără îndoială, aparatul vocal animal, în particular cel uman.

Subcapitolul **1.4. Propagarea undelor acustice** are drept obiect de studiu transmiterea undelor sonore. Sunt definite unda acustică, viteza de propagare, lungimea de undă, suprafața de undă, raza acustică, câmpul acustic, energia acustică, intensitatea sonoră, difracția, absorbția și caracteristica de directivitate.

2. ACUSTICA TEHNICĂ

Dezvoltarea continuă și accelerată a acusticii, prin îmbogățirea permanentă a conținutului său, a condus la necesitatea unei riguroase specializări. Astfel, acustica tehnică a preluat toate aspectele practice privind sunetul.

În cuprinsul capitolului 2. *Acustica tehnică* sunt analizate sistemele electroacustice destinate producerii, captării, redării și înregistrării sunetelor, fiind prezentate și principalele aparate pentru analiza lor în condiții de laborator. Acustica încăperilor este un subdomeniu al acusticii tehnice, având ca obiect studierea fenomenelor acustice care apar în spații închise, pentru asigurarea calităților impuse construcțiilor și a confortului din punct de vedere sonor.

Subcapitolul 2.1. *Producerea sunetelor* prezintă circuitele electronice care, în anumite condiții, generează semnale. În funcție de condițiile de producere a semnalului, aceste circuite (numite generatoare), se clasifică în oscilatoare (generatoare de oscilații întreținute) și generatoare comandate.

Subcapitolul 2.2. *Captarea și redarea sunetelor* prezintă, pe de o parte, operația care asigură transpunerea tuturor informațiilor oferite de sursele de sunet care compun scena sonoră, în semnale electrice – numită captare, precum și dispozitivele utilizate pentru redarea sunetelor. În primul caz vorbim despre microfoane (caracterizate cu ajutorul următorilor indici calitativi: sensibilitatea, caracteristica de frecvență, rezistența internă, factorul de distorsiuni, zgomotul de fond, caracteristica de directivitate). În cazul al doilea se utilizează difuzoarele (traductoare electroacustice), care transformă curentul de audiofrecvență furnizat de un amplificator de putere, în unde acustice.

În cuprinsul subcapitolul **2.3. Înregistrarea sunetelor** sunt arătate procedeele de înregistrare magnetică și optică numerică utilizate în prezent, incluzând principiile de funcționare, schemele bloc ale aparatelor și caracteristicile suporturilor de înregistrare.

Este bine cunoscută importanța electronicii pentru civilizația zilelor noastre. Astăzi nu există domeniu de activitate și nici laboratoare de cercetare unde electronica să nu fie prezentă. Subcapitolul **2.4. Aparate pentru studiul sunetelor** prezintă în detaliu dispozitivele electronice utilizate în laboratoarele acustice: generatoare de semnal (oscilatoare și generatoare comandate), filtre cu diferite caracteristici (*trece jos, trece bandă, trece sus și oprește bandă*), aparate de analiză grafică și numerică (osciloscopul catodic, frecvențmetrul, distorsiometrul), precum și aparate speciale (melograful).

Subcapitolul **2.5. Acustica încăperilor** tratează elementele specifice proiectării încăperilor, în special a celor destinate producțiilor muzicale sau audițiilor de înaltă fidelitate, precum și fenomenele care se produc în interiorul lor (reflexia, care determină reverberația și ecoul, precum și difuzia și absorbția).

Preocupările pentru realizarea unei bune audiții datează din antichitate; bazele științei acusticii au fost formulate de școala lui Pitagora, fiind dezvoltate de Aristotel, Aristoxene, iar mai târziu de arhitectul roman Vitruvius Pollio.

Încăperile cu acustică bună sunt cele în care sunetele sunt auzite fără nici un efort din partea ascultătorului și cu aceeași tărie, vorbirea este inteligibilă, iar muzica este clară, în orice punct al încăperii, indiferent de poziția ascultătorului.

În vederea asigurării unei acustici bune într-o încăpere, sunt analizate elementele sale geometrice (formă, dimensiuni) și fizice (durata de reverberație, claritatea muzicii și inteligibilitatea vorbirii, difuzitatea). Reducerea zgomotelor din interiorul și din exteriorul încăperii se realizează prin izolare fonică.

3. ACUSTICA INSTRUMENTELOR MUZICALE

Producerea sunetelor cu ajutorul instrumentelor muzicale este tratată detaliat în capitolul 3. *Acustica instrumentelor muzicale*. Organologia este știința care studiază instrumentele muzicale, sau în sens mai larg, obiectele generatoare de sunete și de zgomote utilizate pentru a acompania, prin sunet și prin ritm, reprezentațiile dramatice, ceremoniile, ritualurile, jocurile, luptele precum și alte activități umane.

Date fiind varietatea construcției și modurile de funcționare, clasificarea instrumentelor muzicale este destul de dificilă. Dacă în Grecia antică existau numai două tipuri de instrumente (de coarde și de suflat), în China antică instrumentele erau împărțite în opt categorii, după materialele din care erau lucrate (piele, piatră, metal, lut ars, mătase, lemn, bambus, tărtăcuță). Teoreticienii indieni au adoptat o clasificare potrivit căreia instrumentele muzicale erau considerate potrivit materialului vibrator, deosebind instrumente cordofone, aerofone, membranofone și autofone (idiofone). Din anul 1914 este acceptat sistemul de clasificare elaborat de muzicologii Erich Moritz von Hornbostel și Curt Sachs, care se bazează pe criteriile fizico-acustice, păstrând totodată deosebirea făcută de Victor-Charles Mahillon între elementul care vibrează și modul de punere al acestuia în vibrație.

În funcție de modul în care este produs sunetul, instrumentele muzicale sunt idiofone, membranofone, aerofone, cordofone și electrofone. Ele mai pot fi clasificate în funcție de felul în care este furnizată energia de punere în vibrație (continuu sau nu), după posibilitatea de a varia sunetul emis (cu sunet fix sau variabil), din punct de vedere al posibilității de a emite sunete simultane (melodice sau monofonice – care pot emite câte un singur sunet; armonice sau polifonice – care pot emite simultan mai multe sunete).

4. ACUSTICA FIZIOLOGICĂ

Acustica fiziologică este ramura acusticii care urmărește mecanismul de percepere a sunetelor și acțiunea lor asupra organismului, precum și producerea sunetului vocal, condițiile de emisie și calitățile vocii. În cuprinsul capitolului **4. Acustica fiziologică** sunt expuse mecanismul producerii sunetului în cazul vocii umane, mecanismul audiției și caracteristicile fiziologice ale sunetului.

Modalitățile de producere a sunetelor muzicale de către aparatul vocal uman sunt în mod evident derivate din mecanismele fiziologice de producere a sunetelor articulate sau nearticulate; acestea din urmă stau așadar la baza tuturor formelor de exprimare verbală sau muzicală. Subcapitolul **4.1. Producerea sunetului – Vocea umană** prezintă teoriile privitoare la producerea vibrațiilor de către vocea umană (teoria mecanică, teoria mio-elastică, teoria aerodinamică, teoria neurocronaxică, teoria muco-ondulatorie, teoria reactiv-rezonatorie), precum și structura organului vocal (care poate fi privit din punct de vedere constructiv ca un instrument de suflat, alcătuit dintr-o sursă de aer – plămâni și mușchii specifici – care acționează un oscilator alcătuit din corzile vocale, semnalul produs fiind condus printr-un rezonator, de unde este radiat spre exterior prin intermediul organelor de articulație).

Subcapitolul **4.2. Mecanismul audiției** prezintă detaliat auzul uman, simțul cu ajutorul căruia se percep sunetele. Deoarece urechea asigură trecerea de la sunetul fizic la senzația sonoră, studierea anatomiei urechii oferă posibilitatea de a explica mecanismul auzului. Aparatul auditiv captează vibrațiile sonore, pe care le sortează, clasificându-le după frecvență (care va deveni senzație de înălțime), după intensitate (care va deveni senzație de tărie) și după componența spectrală (care va deveni senzație de timbru). Pentru a fi percepute sub formă de sunet,

vibrațiile acustice care ajung la ureche trebuie să îndeplinească anumite condiții cu privire la frecvența, intensitatea și durata lor. Particularitățile organului auditiv sunt următoarele: neliniaritatea, variația minimă perceptibilă a intensității, variația minimă perceptibilă a frecvenței, diferența minimă perceptibilă în durata sunetului, efectul de acoperire.

Simțul auzului posedă un mecanism complex, superior celorlalte simțuri. Limbajul muzical s-a născut prin senzațiile și impresiile create de simțul auzului, în care se întrepătrund fenomene de ordin psihic. Astfel putem vorbi de memoria muzicală, audiția interioară, reprezentarea sonoră (și muzicală).

Subcapitolul **4.3. Caracteristicile fiziologice ale sunetului** prezintă felul în care sunt interpretate sunetele. Deoarece oscilațiile acustice ale aerului sunt transformate de ureche în senzații auditive, se impune definirea caracteristicilor fiziologice ale unui sunet prin stabilirea corelației care există între aceste mărimi și mărimile fizice corespunzătoare excitației.

Din punct de vedere subiectiv un anumit sunet are trei caracteristici fiziologice care îl deosebesc de celelalte sunete: înălțimea, tăria și timbrul. Senzația auditivă nu depinde numai de tărie, înălțime și timbru, fiind determinată și de regimul tranzitoriu din perioadele de formare și de stingere a sunetului, de durata emiterii sunetului și de uniformitatea cu care este emis.

Experimental s-a constatat că un sunet de frecvență dată pare mai înalt dacă nivelul de intensitate sonoră crește, relația dintre înălțimea sunetului și frecvență dovedindu-se a fi destul de complexă. Perceperea înălțimii unui sunet este influențată și de valoarea minimumului perceptibil la schimbarea frecvenței excitatoare. La un nivel de intensitate sonoră medie, de 60 dB, o persoană percepe schimbarea înălțimii unui sunet dacă frecvența acestuia variază cu aproximativ 3 Hz pentru frecvențe sub 1.000 Hz și cu 0,3 % din frecvență, dacă aceasta este mai mare.

5. ACUSTICA MUZICALĂ

Acustica muzicală este disciplina care are ca obiect studiul fenomenelor sonore care stau la baza artei sunetelor: producerea sunetelor de către instrumentele muzicale, structura intervalelor muzicale, organizarea sunetelor și a intervalelor muzicale în structuri specifice (moduri, game, acorduri, sisteme de intonație și de acordaj muzical). În cadrul capitolului 5. *Acustica muzicală* este prezentată, pe scurt, evoluția acusticii muzicale, sunt menționate tratatele de teorie muzicală și sunt analizate fenomenul rezonanței naturale, intervalele muzicale și sistemele acustice muzicale.

5.1. *Evoluția acusticii muzicale*

Pentru o mare perioadă de timp intervalele muzicale au fost definite prin raporturi matematice între lungimile de coardă ale monocordului (abordare proprie teoreticienilor din Grecia antică). Deoarece raporturile matematice au început a fi considerate prea abstracte pentru a defini elemente ale muzicii, s-a manifestat un interes tot mai crescut pentru studierea producerii sunetelor din punct de vedere fizic. În secolul al XVII-lea s-au făcut primii pași în definirea acusticii muzicale ca știință. Un veac mai târziu preocuparea cercetătorilor a fost determinarea frecvențelor proprii ale corpurilor sonore, trecând mai apoi la observarea experimentală a fenomenelor specifice acusticii muzicale. Experimentele acustice au continuat și în secolul XX, când, preluând cunoștințele acumulate anterior, beneficiind și de avantajele utilizării aparatului electronic și a tehnicii de calcul, cercetătorii epocii moderne au împins mai departe granițele cunoașterii acusticii muzicale. Trecerea de la înregistrarea analogică la cea numerică a oferit o formidabilă putere de calcul, cercetătorii având la îndemână un număr impresionant de aparate și tehnici de lucru.

5.2. Tratatete de teorie a muzicii

Prin teorie muzicală se înțelege disciplina care oferă o bază științifică pentru studiul elementelor constitutive ale artei muzicale, generate în special de durata și înălțimea sunetului. În sens strict teoria muzicală poate răspunde la probleme fundamentale referitoare la notație, intervale, scări, sisteme de intonație și acordaj, iar în sens mai larg poate îngloba subdomenii care se ocupă de melodie, ritm, contrapunct, armonie, orchestrație și compoziție. Există mai multe direcții de dezvoltare: Vest-Europeană, Bizantină, Arabă, Chineză, Indiană.

Termenul *teorie* derivă din limba elină, sensul său fiind de a studia, a observa. De la scrierile Greciei antice și până în prezent teoria muzicii a cunoscut numeroase stadii de dezvoltare, de la abordarea matematică la cea determinată de legile fizicii, de la cea bazată pe percepția senzorială la cea abstractă, de la gândirea exclusiv teoretică la cea dedusă din practica muzicală, culminând cu gândirea enciclopedică.

5.3. Rezonanța naturală

Armonicele superioare ale unui sunet constituie un set de sunete având frecvențele înrudite prin numere întregi. Seria armonică este un set de sunete ale căror frecvențe sunt multipli întregi ai unei fundamentale. Producerea sunetelor armonice a fost semnalată de Gioseffo Zarlino, René Descartes, Marin Mersenne, John Wallis, Joseph Sauveur, Jean-Philippe Rameau, Giuseppe Tartini, Daniel Bernoulli, Hermann von Helmholtz, Hugo Riemann și Arthur von Oettingen.

5.4. Monocordul

Se presupune că monocordul, instrument cu o singură coardă, a fost inventat de Pitagora în secolul al V-lea î.e.n.; a fost utilizat în scop experimental și didactic până în secolul al XIX-lea iar ca aparat tehnic a fost folosit în Evul mediu târziu și chiar în Renaștere în scopul acordării tuburilor de orgă. În general

diviziunile monocordului sunt prezentate de teoreticieni sub forma proporțiilor sau a lungimilor de coardă. Divizarea monocordului se poate efectua descendent (în Grecia antică) și ascendent (în Evul mediu, prin Boethius).

5.5. Sistemele acustice muzicale

Sistemele acustice muzicale se împart în două mari categorii: netemperate (utilizează numai serii de sunete care se produc din fenomene fizice) și temperate (bazate pe modificarea intervalelor derivate din seriile de sunete sau formate prin divizarea octavei perfecte în intervale egale, generatoare). Vocea umană, instrumentele de suflat precum și cele de coarde acționate prin intermediul arcușului utilizează acordajul netemperat. Instrumentele cu claviatură moderne și cele de coarde cu taste metalice folosesc intonația temperată. Termenul de sistem netemperat a apărut ulterior celui de sistem temperat din necesitatea de a face o distincție clară între cele două moduri de organizare a materialului sonor.

Sistemele acustice muzicale sunt prezentate în funcție de zona geografică în care au fost sau sunt utilizate, astfel: în subcapitolul **5.5.A.** sistemele acustice asiatice (arabo-persane, hinduse, chineze, japoneze, coreene, vietnameze, birmaneze, thailandeze, javaneze); în **5.5.B.** sistemele netemperate Pitagora și Zarlino; în **5.5.C.** cele temperate; în **5.5.D.** cele naturale; în **5.5.E.** sistemele mezotonice franceze, germane și italiene; în **5.5.F.** sistemele inegal temperate; în **5.5.G.** cele promovate de Marin Mersenne, Joseph Sauveur, Nicolaus Mercator și William Holder, Paul von Janko, Wesley Woolhouse precum și sistemul egal temperat; în **5.5.H.** sistemele bizantine (în varianta propusă de Hrisant, preluată de Macarie Ieromonahul, precum și în varianta promovată de Anton Pann); în **5.5.I.** sistemele microtonale. Subcapitolul **5.5.J.** prezintă câteva sisteme care ar fi putut fi folosite la elaborarea de către Johann Sebastian Bach a *Clavecinului bine temperat*, iar **5.5.K.** enumeră microintervalele utilizate în sistemele temperate.

5.6. Metode de analiză a sistemelor acustice muzicale

Definirea teoretică și utilizarea practică, în decursul timpului, a numeroase sisteme acustice muzicale, construite pe baza unor criterii diverse, i-a determinat pe teoreticienii muzicii să caute metode eficiente pentru studierea și compararea lor. Compunerea intervalelor exprimate prin raporturi numerice simple se poate realiza foarte ușor prin înmulțirea, respectiv împărțirea acestor raporturi între ele. Dată fiind diversitatea teoriilor care au stat la baza construirii acestor sisteme, s-a încercat realizarea unui sistem temperat “unic”, care să conțină în scara sa generală toate intervalele componente ale sistemelor acustice muzicale.

5.6.1. Metode de unificare a sistemelor acustice muzicale

Sistemele acustice muzicale se clasifică în netemperate și temperate, în funcție de modul în care au fost definite prin formule matematice de calcul. Din cauză că aceste formule de calcul sunt puțin compatibile sau chiar incompatibile între ele, fiind specifice fiecărui tip de sistem, apare problema imposibilității efectuării unei analize comparate, în mod direct, la nivel matematic teoretic.

O primă metodă de analiză se bazează pe compararea directă a valorilor intervalelor componente ale sistemelor. Metoda prezintă două mari dezavantaje: compararea se face destul de greu, având în vedere faptul că valorile intervalelor sunt de tip real, cu foarte multe zecimale; din cauza caracteristicii logarimice a percepției umane, compararea diferitelor regiuni intervalice ale octavei, în cadrul sistemelor analizate, este practic imposibilă. Această metodă este utilă doar pentru a putea stabili relații paralele, simple, între treptele de același rang ale sistemelor respective.

A doua metodă de analiză a sistemelor se bazează pe transformarea valorilor intervalelor componente ale sistemelor respective utilizând formule care permit efectuarea unor analize comparate între toate elementele intervalice ale sistemelor considerate, transformând astfel funcțiile de tip neliniar în funcții de tip

liniar. Astfel, intervalele vor fi exprimate prin logaritmi, deoarece senzațiile sunt definite prin logaritmi stimulilor.

Este știut faptul că în cercetarea acustică a sistemelor de intonație și acordaj muzical s-au utilizat logaritmi cu diverse baze: Mercator a utilizat logaritmi zecimali, Euler cu baza 2, Bellerman a lucrat cu cenți, iar Riemann cu toate variantele. Cel mai potrivit mod de calcul folosește logaritmi cu baza 2, deoarece aceștia corespund foarte bine cu proprietatea urechii de a percepe drept octave superioare frecvențe care cresc ca puteri întregi ale numărului 2.

O variantă simplificată a acestei metode este construirea sistemelor prin calculul intervalelor componente ca fiind termenii unei progresii geometrice de rație egală cu radicalul din doi, de indice bine determinat. Aceasta oferă seturi de valori ale intervalelor cuprinse în scara unui anumit sistem, fiind mai avantajoasă decât varianta de calcul prin logaritmi, care este mai dificilă.

Pentru a putea efectua o analiză comparată a unor sisteme de intonație și acordaj muzical, acestea trebuie unificate, astfel încât valorile corespunzătoare intervalelor care le alcătuiesc să facă parte din cadrul valorilor unui nou sistem de intonație și acordaj muzical, altfel spus acest nou sistem să le încorporeze în structura sa. Ulterior realizării practice a acestui sistem, numit *sistem temperat unic*, se va putea afirma, privind de această dată din perspectiva acestui nou sistem, că sistemele acustice muzicale teoretizate în decursul istoriei muzicii au devenit cazuri particulare ale sistemului temperat unic. Este evident faptul că acest nou sistem nu poate fi definit decât ca un sistem temperat, pentru a urmări astfel caracteristica logaritmică a percepției noastre.

Deoarece sunetele componente ale unui sistem temperat pot fi calculate pe baza unei progresii geometrice, pentru a alcătui o scară temperată, procedăm astfel: calculăm rația progresiei prin aflarea radicalului - de ordin egal cu numărul de secțiuni ale octavei - din 2 (octava perfectă); calculăm sunetele componente ca fiind termenii de indici dați de cummul secțiunilor luate de la baza scării până la

nota respectivă (corespunzătoare intervalului respectiv). Acești termeni selectați formează împreună scara sistemului respectiv.

Pentru a determina *sistemul temperat unic* sau pentru a unifica sistemele acustice muzicale, definim un set de reguli numit *teoreme de unificare*.

Prima teoremă de unificare parțială afirmă că sistemele de intonație și acordaj muzical de tip temperat se pot reduce la o singură formulă de calcul, prin aflarea celui mai mic multiplu comun al numerelor de secțiuni ale sistemelor de unificat. Se obține astfel o progresie generală parțială, cu o rație determinată.

O variantă a acestei metode de unificare este cea în care se alege (în mod mai mult sau mai puțin arbitrar) unul din sisteme ca fiind sistem de referință, celelalte sisteme recalculându-se în funcție de acesta. Definim astfel *a doua teoremă de unificare parțială* care afirmă că sistemele de intonație și acordaj muzical de tip temperat se pot reduce la o singură scară, prin raportarea lor la un singur sistem considerat sistem de referință. Sunetele tuturor sistemelor se vor calcula prin raportare la acesta.

Sistemele netemperate prezintă o mare varietate de intervale, care aparent nu sunt proporționale între ele. Spunem aparent, deoarece teoretic și practic se poate găsi, prin micșorare extremă, rația unei progresii geometrice, progresie ai cărei termeni luați prin selecție să formeze un sistem temperat. Pentru a găsi această progresie, trebuie să aflăm întâi câte secțiuni ar avea un astfel de sistem.

Pentru realizarea acestui demers se definește *teorema de transformare parțială* astfel. Orice sistem de intonație și acordaj muzical netemperat se poate calcula ca un sistem temperat, alcătuit din sunete selectate din termenii unei progresii geometrice de rație corespunzătoare. Rația acestei progresii se determină ca fiind egală cu cel mai mic interval din structura sistemului muzical respectiv netemperat (un caz particular este alegerea diferenței dintre intervalele a două sisteme netemperate distincte, cum ar fi *schisma*). Sistemele netemperate pot fi apoi unificate ca orice sistem temperat.

Următoarea etapă în demersul unificării generale a sistemelor o reprezintă determinarea unui sistem temperat (unic) care să conțină printre sunetele sale componente, sunetele tuturor celorlalte sisteme acustice muzicale. Pentru a realiza acest sistem, trebuie unificate mai întâi sistemele netemperate, obținând un sistem temperat intermediar, apoi acesta va fi unificat cu celelalte sisteme temperate de comparat.

Pentru a realiza *sistemul temperat unic* definim *teorema de unificare generală a sistemelor*, astfel: orice sistem de intonație și acordaj muzical, temperat sau netemperat, infraoctavian, octavian sau superoctavian, poate fi redus la o singură formulă de calcul, unică, ce poartă numele de formula generală de calcul a sistemelor. Aceasta este formula unei progresii geometrice având termenul general: $a_n = a_1 \cdot q^{n-1}$ sau $a_n = 2^{n/m}$, unde n este indicele sunetului iar m este egal cu numărul total de microintervale a sistemului temperat unic.

Pentru clarificarea metodei de realizare a sistemului temperat unic mai sunt necesare încă două precizări, enunțate sub forma unor corolare. Primul afirmă că valorile intervalelor sunetelor componente ale diferitelor sisteme acustice muzicale se găsesc în șirul de valori ale progresiei geometrice generale (corespunzătoare sistemului temperat unic). Al doilea specifică faptul că valoarea rației absolute a progresiei geometrice generale se calculează ca fiind radicalul din doi de indice egal cu cel mai mic multiplu comun al numerelor totale de secțiuni ale tuturor sistemelor temperate, sau netemperate, cunoscute, reduse la progresii geometrice. Această rație se alege astfel încât diferența între valorile intervalelor calculate prin această metodă și valorile corespunzătoare sistemelor de unificat să nu depășească valoarea diferenței de frecvență minimă perceptibilă ($\Delta f / f$), egală cu aproximativ 3 Hz, în apropierea valorii de 1.000 Hz (calculată la un nivel de intensitate sonoră de peste 60 dB). Pentru mai multe detalii asupra acestui aspect este necesară detalierea câtorva probleme de acustică fiziologică.

5.6.2. *Elemente de acustică fiziologică*

Cercetătorii au demonstrat că înălțimea muzicală este direct proporțională cu logaritmul natural al raportului dintre o frecvență anumită și frecvența sunetului cel mai grav care poate fi perceput (numit prag de excitație).

S-a observat că urechea nu simte variația frecvenței unui sunet dacă această variație rămâne sub o anumită valoare. Minimul perceptibil în variația frecvenței depinde de frecvența existentă înainte de variație și de nivelul de tărie al senzației sonore. Variația minimă de frecvență care îi corespunde o variație perceptibilă a înălțimii sunetului se numește *variație critică de frecvență* sau *prag diferențial de înălțime*. La extremitatea gravă a scării muzicale variația ajunge la 12 ‰, în zona 500 – 3.000 Hz este de aproximativ 3 ‰ iar la extremitatea acută a percepției umane ea crește din nou până la 7 ‰. Este evident că valoarea absolută a variației minime perceptibile nu înregistrează brusc salturi atât de mari de la un registru la altul, ci urmează o curbă de evoluție continuă. Ținând cont de faptul că teoreticienii muzicii sunt interesați strict de variația minimă perceptibilă a frecvenței sunetelor din cadrul unei plaje de frecvențe medii ale sunetelor scării muzicale, se poate utiliza fără probleme valoarea de 3 ‰. Aceasta este valoarea maximă a variației critice de frecvență, detectată în cazul intonării armonice (simultane) a două sunete muzicale, atunci când nu intervine fenomenul bățiilor acustice; în cazul intervalelor intonate melodic (succesiv) capacitatea discriminatorie a auzului este mai redusă.

5.6.3. *Considerații istorice cu privire la metoda unificării*

În decursul timpului cercetătorii au încercat să realizeze sisteme temperate care să reproducă cât mai fidel intonația naturală, pentru a obține cât mai multe intervale consonante. Pornind de la acest deziderat, unii autori au realizat chiar sisteme în care diviziunea de bază era micșorată foarte mult pentru a putea descrie cât mai exact toate sistemele, netemperate și temperate. Alegerea unui anumit

număr de diviziuni a fost dictată de rațiuni tehnice: să nu existe fracții sau numere zecimale și să aproximeze cât mai fidel valorile naturale cuprinse în primele cinci diviziuni ale monocordului. Sistemele care corespundeau acestor cerințe au fost teoretizate de Nicolaus Mercator (53 diviziuni), Wesley Woolhouse (730 diviziuni), Sir Jacob Herschel (301 diviziuni). Deși nu a propus realizarea unui sistem acustic muzical, Alexander John Ellis a propus divizarea octavei în 1200 centisemitonuri (cenți), valoare utilizată și în prezent.

5.6.4. *Aplicație practică. Considerații cu privire la diferențele dintre sistemul adoptat de Macarie Ieromonahul și cel promovat de Anton Pann*

Atât sistemul bizantin promovat de Macarie Ieromonahul (sistem preluat de la Hrisant) cât și cel propus de Anton Pann sunt sisteme temperate cu sunete selectate. În muzica bizantină spațiul cuprins între un sunet de bază și sunetul aflat la octava superioară cuprinde, prin definiție, 68 de secțiuni (respectiv 22 de secțiuni în cazul sistemelor lui Anton Pann).

Se pune întrebarea dacă urechea umană percepe diferențe semnificative atunci când o lucrare muzicală este interpretată consecutiv sau simultan, în cele două sisteme, cu 68, respectiv cu 22 de secțiuni.

Observăm că în sistemul lui Macarie octava cuprinde de aproximativ trei ori mai multe diviziuni decât în sistemul lui Anton Pann: $68 : 22 = 3,0909$. Putem transforma sistemul lui Anton Pann într-un sistem cu 68 de secțiuni, înmulțind cu 3,0909 numărul de secțiuni ale intervalelor care compun scările muzicale propuse de Anton Pann.

În lucrare sunt prezentate, în paralel, pentru exemplificare, scara ehului I, scara ehului al II-lea și scara ftoalei *muștar*, în mod grafic, astfel: primul grafic în notația lui Anton Pann cu 22 secțiuni; al doilea grafic în notația lui Anton Pann, modificat, cu 68 secțiuni; al treilea grafic în notație Hrisantică (Macarie), cu 68 secțiuni.

Pentru fiecare grup de desene (corespunzător fiecărei scări alese ca exemplu) am alcătuit un tabel în care am prezentat, în grupuri de câte patru rânduri, numărul de secțiuni pentru fiecare interval, respectiv numărul total de secțiuni raportat la bază, în sistemul Macarie și în sistemul lui Anton Pann, modificat.

Comparând valorile fiecărui interval, obținute prin recalcularea sistemului lui Anton Pann în 68 de secțiuni, cu intervalele lui Macarie, observăm că primele au o variație maximă cuprinsă între $-0,82$ și $+0,50$ secțiuni. Comparând valorile fiecărui interval obținut raportat la baza scării, observăm că variația maximă este cuprinsă între $-0,82$ și $+0,80$ secțiuni.

Deși în nici unul din cazurile analizate variația de înălțime nu depășește 1 secțiune, auzul uman este capabil să o distingă deoarece în sistemul cu 68 de secțiuni raportul dintre două sunete aflate la distanță de 1 secțiune este 1,01024547, mai mare decât cel mai mic interval perceput de auz (1,003).

5.6.5. Aplicație practică. Considerații cu privire la diferențele dintre sistemele promovate de Macarie Ieromonahul, Anton Pann și sistemul egal-temperat

Comparăm sistemele bizantine promovate de Hrisant și Macarie Ieromonahul (*bizantin 68*), Anton Pann (*bizantin 22*) și sistemul egal-temperat (cu 12 semitonuri egale), luat ca referință. Prin unificare se obține un sistem temperat cu 2.244 de microdiviziuni în octavă. Se realizează în noul sistem temperat cele trei sisteme considerate inițial și se observă că în sistemul bizantin 68 tonul mare și tonul mic sunt mai reduse, semitonul fiind mai mare decât în sistemul bizantin 22.

Ne întrebăm dacă există diferențe observabile când o piesă muzicală este intonată în sistemele Macarie (bizantin 68), Pann (bizantin 22) și egal-temperat.

Considerăm Glasul I în sistemele bizantin 22 și bizantin 68, precum și transcrierea lui în sistemul temperat 12. Luăm drept referință sistemul egal

temperat sau sistemul bizantin 68 și trasăm graficele înălțimilor sunetelor componente, indicând diferențele, în microdiviziuni, dintre treptele omonime.

Din primul grafic deducem că sistemul egal-temperat nu poate fi folosit în interpretarea pieselor bizantine, deoarece este total diferit structural de acestea; el ridică majoritatea sunetelor componente ale scării glasului I, în special pe Vu (Mi) și pe Zo (Si), coborând pe Ke (La). Interpretând al doilea grafic, se observă că Vu (Mi) și Zo (Si) sunt mai acute în Anton Pann, iar Ga (Fa) și Ni' (Do superior) sunt mai acute în Macarie; intervalele Vu - Ga (Mi - Fa) și Zo - Ni' (Si - Do superior) sunt mai mari în Macarie decât în Anton Pann; sistemul egal-temperat ridică sunetul Vu (Mi) cu 77 microdiviziuni (aproximativ un sfert de ton mic) și pe Zo (Si) cu 69 microdiviziuni (o treime de semiton Macarie).

Prin simplificarea sistemului, Anton Pann micșorează semitonul, mărind în schimb tonul mare și tonul mic. Diferențele dintre intervalele principale ale sistemului său sunt mai mari decât în cazul sistemului adoptat de Macarie.

Pentru a generaliza suprapunem graficele celor trei sisteme, fiecare sunet component fiind raportat la cel aflat la baza scării. Pentru fiecare interval "curba" trece printr-un punct superior (pentru valoarea cea mai mare), inferior (pentru valoarea cea mai mică) sau rămâne la nivelul inițial (pentru valoarea intermediară), având direcție ascendentă, descendentă respectiv nemodificată.

Pentru a verifica rezultatele calculelor, utilizăm un program al subsetului informatic *Minerva* versiunea 2.0, care permite formarea sistemului cu 2.244 de trepte, calculând și intonând frecvențele treptelor celor trei sisteme, în grupuri de câte trei sunete. În final programul prezintă în mod grafic variația sistemelor analizate. Se observă că diferențele de intonație a unei melodii în fiecare din cele trei sisteme acustice muzicale sunt sesizabile, motiv pentru care se poate afirma că fiecare dintre aceste sisteme conferă melodiei interpretate un caracter specific.

Reducerea sistemelor acustice muzicale la sistemul temperat unic se dovedește a fi un bun instrument teoretic.

6. ANALIZA COMPUTERIZATĂ

În contextul evoluției spectaculoase a informaticii din ultimul deceniu, calculatorul s-a dovedit a fi un instrument indispensabil în activitatea de cercetare atât în abordarea teoretică matematică cât și în știință și tehnică. Apariția calculatoarelor electronice a produs o adevărată revoluție în modul de abordare a problemelor, determinând apariția și dezvoltarea informaticii ca știință a prelucrării automate a datelor.

6.1. Structura calculatorului personal

Calculatorul este un sistem fizic care prelucrează datele într-o formă prestabilită și furnizează rezultatele într-o formă accesibilă utilizatorului sau altui dispozitiv cu care este conectat. Este alcătuit din două componente de bază: hardware sau fizică (dispozitivele și echipamentele fizice) și software sau logică (programele destinate conducerii și controlului sistemului de calcul).

6.2. Utilizarea calculatorului personal în domeniul muzical

Calculatorul personal poate fi solicitat în domeniul muzical în următoarele moduri distincte: asistarea utilizatorului în rezolvarea unor probleme de ordin teoretic și aplicativ-practic prin analiza calitativă și cantitativă a structurilor muzicale de bază (teorie muzicală), rezolvarea unor teme de lucru (orchestrație și contrapunct), generarea de structuri muzicale complexe (compoziție), editarea partiturilor, alcătuirea bazelor de date cu tematică muzicală, producerea sunetelor pe cale electro-mecanică, producerea sunetelor pe cale electronică, prin sinteză.

O clasificare a programelor de calculator dedicate muzicii, pe tipuri de aplicații, este următoarea: înregistrare audio, editare și procesare audio, sinteză

audio și editare de sunete, restaurare audio, editare grafică, baze de date, programe didactice, programe utilitare, programe de compoziție.

6.3. Programarea calculatorului personal

Calculatoarele electronice pot soluționa numai genul de probleme pentru care sunt programate, neputând construi singure algoritmi și nici învăța. Utilizarea calculatoarelor necesită, deci, elaborarea programelor (mulțimi ordonate de instrucțiuni) pe baza cărora se obțin rezultatele dorite prin aplicarea unui algoritm (mulțime finită de operații) asupra datelor de intrare.

Un limbaj de programare utilizat în sistemul românesc de învățământ este *Pascal*, care beneficiază de numeroase variante (cum ar fi *Turbo Pascal* care oferă un mediu integrat de realizare și execuție a programelor).

Sistemele acustice muzicale pot fi analizate cu ajutorul calculatorului electronic prin efectuarea calculelor numerice urmate de intonarea valorilor frecvențelor corespunzătoare fiecărui interval component al sistemelor. Programul astfel conceput oferă ca date de ieșire frecvențele corespunzătoare sunetelor componente ale fiecărui sistem acustic muzical și de asemenea permite ascultarea acestor sunete. Se poate modela fenomenul rezonanței naturale superioare (sau inferioare) pe orice treaptă sau frecvență și de asemenea se pot compara (numeric și auditiv) și raporta între ele valorile astfel obținute.

6.4. Setul de programe informatice muzicale “Apollo”

Setul de programe *Apollo* a fost realizat de autor în anul 1996 și cuprinde mai multe programe, cu o arie largă de utilizare. În meniul principal *Apollo*, cu ajutorul tastelor funcționale pot fi apelate opt programe, astfel:

F2 **Program Pann**

F3 **Program Macarie**

Opțiunile *Pann* și *Macarie*, apelabile cu ajutorul tastelor funcționale F2, respectiv F3, calculează frecvențele și intonează sunetele corespunzătoare pentru toate scările muzicii psaltice promovate de Anton Pann și Macarie Ieromonahul. Pentru fiecare sistem sunt prezentate clasificarea, sunetele și intervalele scării, precum și frecvențele exacte și rotunjite la valori întregi, pentru fiecare sunet din componența scării. Pentru ușurința prezentării, sistemele muzicale au fost clasificate astfel: clasa (sistem temperat sau netemperat), subclasa (numărul de diviziuni ale octavei temperate), grupa (în cazul sistemelor bizantine este vorba despre glasuri sau ftoale), subgrupa (sistem autentic sau plagal), specia (scară diatonică, cromatică sau enarmonică), subspecia (subordonarea unui anumit sistem), structura (octavianță, difonică sau trifonică), numele scării.

Fiecare scară din sistemele enumerate poate fi apelată cu ajutorul tastelor funcționale F2 – F9 sau prin combinarea acestora cu tastele Shift, Ctrl sau Alt.

F4 *Programe teoretice aplicative - Minerva*

Cu ajutorul tastei funcționale F4 se lansează în execuție programul numit “Minerva”, având următoarele subprograme:

Minerva F2 - Program pentru acordarea instrumentelor muzicale

Calculatorul intonează sunetele cerute de operator conform sistemului egal temperat. Pentru o acuratețe suficient de mare sunt prezentate diferențele în fracțiuni de Hz, operatorul efectuând acordajul pe baza bățiilor acustice produse de cele două sunete: al calculatorului și al instrumentului muzical.

Minerva F7 - Program pentru calculul diviziunilor sistemelor temperate

Minerva F8 - Program pentru calculul sunetelor sistemelor temperate

Calculatorul cere numărul de secțiuni ale octavei sistemului temperat, apoi calculează dimensiunea unei diviziuni. Se introduce frecvența sunetului de pornire și tempoul, apoi calculatorul indică frecvențele și intonează sunetele scării.

Varianta apelabilă cu tasta F8 permite introducerea numărului de sunete totale și a numărului de diviziuni pentru fiecare interval, raportat la baza scării.

Minerva F9 - Program pentru intonarea armonicelor unui sunet

Programul calculează și intonează sunetele corespunzătoare armonicelor superioare, respectiv inferioare, ale unui sunet cu frecvență dată (numit etalon).

F5 Solfegiu pentru începători

F6 Solfegiu melodic

Cu ajutorul tastelor F5 și F6 se lansează în execuție un solfegiu melodic (*Euterpe*, respectiv *Orfeu*). Calculatorul prezintă partitura și intonează melodia. În varianta pentru începători, calculatorul indică și numele notei muzicale.

F7 Exercițiu ritmic

Prin apăsarea tastei funcționale F7, pe ecranul calculatorului se afișează un exercițiu ritmic. Calculatorul prezintă partitura exercițiului pe care îl intonează.

F8 Dictat muzical melodic

Tasta F8 pornește programul intitulat *Hermes*, pentru dictat muzical melodic. Calculatorul intonează sunetul la¹, tacează două măsuri libere și intonează dictatul, apoi afișează tonalitatea și măsura. Intonează de trei ori câte două măsuri simple, apoi cele două măsuri prezentate și următoarele două. La final, calculatorul prezintă partitura dictatului, pe care îl interpretează.

F9 Nebo. Muzică bizantină

Programul numit *Nebo* prezintă partitura unei melodii bizantine, în notație neumatică, cu text. Melodia poate fi interpretată în sistemul egal temperat (tasta F2), Macarie cu 68 secțiuni (tastele F3 – diatonic, F4 – enarmonic, F5 – agem varis

enarmonic) și Anton Pann cu 22 secțiuni (tastele F6 – enarmonic agem, F7 – varis diatonic), în mișcare stihirică (tasta F8) sau irmologică (tasta F9).

ÎNCHEIERE

În general, tratatele de teorie a muzicii prezintă, mai detaliat sau mai pe larg, numai o parte din sistemele de intonație și acordaj muzical folosite în multimilenara istorie a muzicii. Subiectul este deosebit de vast și necesită o abordare multidisciplinară prin definirea structurilor muzicale din punct de vedere al organizării (sisteme acustice muzicale, scări muzicale, intervale, etc.), explicarea fenomenelor fizice fundamentale și a metodelor de calcul matematic. Din punct de vedere didactic și aplicativ – practic s-a dovedit necesară și o serie de metode de măsură a parametrilor fizici cu ajutorul unor aparate de laborator și a mijloacelor moderne de calcul.

Muzica i-a preocupat pe oameni încă din timpuri străvechi, atât ca artă cât și ca știință a sunetelor. Ținând cont de interesul tot mai crescut pentru muzica veche, atât din partea melomanilor cât și a cercetătorilor, este evident faptul că fenomenul muzical trebuie abordat dintr-o perspectivă din ce în ce mai largă, cercetarea muzicologică primind un aport substanțial din partea disciplinelor care studiază matematica teoretică și aplicată, fizica, electronica și informatica.

Lucrarea de față a prezentat elementele esențiale ale acestui demers inovator, oferind o bază temeinică pentru studierea comparată a sistemelor acustice muzicale și pentru analiza melodică complexă a lucrărilor muzicale care utilizează aceste sisteme.

CUPRINS

INTRODUCERE

1

1.	ACUSTICA FIZICA	3
1.1.	Undele elastice	4
1.2.	Proprietatile fizice ale sunetului	24
1.3.	Producerea undelor acustice	31
1.4.	Propagarea undelor acustice	51
2.	ACUSTICA TEHNICA	61
2.1.	Producerea sunetelor	62
2.2.	Captarea si redarea sunetelor	74
2.3.	Înregistrarea sunetelor	81
2.4.	Aparate pentru studiul sunetelor	86
2.5.	Acustica încaperilor	99
3.	ACUSTICA INSTRUMENTELOR MUZICALE	113
3.1.	Instrumente idiofone	116
3.2.	Instrumente membranofone	122
3.3.	Instrumente aerofone	123
3.4.	Instrumente cordofone	141
3.5.	Instrumente electrofone	151
3.6.	Instrumente mecanice automate	161
4.	ACUSTICA FIZIOLOGICA	167
4.1.	Producerea sunetului - Vocea umana	168
4.2.	Mecanismul auditiiei	176
4.3.	Caracteristicile fiziologice ale sunetului	198
5.	ACUSTICA MUZICALA	206
5.1.	Evolutia acusticii muzicale	207
5.2.	Tratatele de teorie a muzicii	213
5.3.	Rezonanta naturala	261
5.4.	Monocordul	264
5.5.	Sistemele acustice muzicale	267
5.5.A.1.	Sistemele acustice arabo-persane	268
5.5.A.2.	Sistemele acustice hinduse	297
5.5.A.3.	Sistemele acustice chineze	322
5.5.A.4.	Sistemele acustice japoneze	333
5.5.A.5.	Sistemele acustice coreene	342
5.5.A.6.	Sistemele acustice vietnameze	343
5.5.A.7.	Sistemele acustice birmaneze	348
5.5.A.8.	Sistemele acustice thailandeze	353
5.5.A.9.	Sistemele acustice javaneze	355
5.5.B.1.	Sistemul acustic Pitagora	356
5.5.B.2.	Sistemul acustic Zarlino	366
5.5.C.	Sistemele acustice temperate	372
5.5.D.	Sistemele acustice naturale "juste"	374

5.5.E.	Sistemele acustice mezotonice	379
5.5.E.1.	Sistemul mezotonic cu opt tertele naturale	385
5.5.E.2.	Sistemele mezotonice franceze	386
5.5.E.3.	Sistemele mezotonice germane	393
5.5.E.4.	Sistemele mezotonice italiene	401
5.5.F.	Sistemele inegal temperate	404
5.5.G.1.	Sistemul temperat Mersenne	407
5.5.G.2.	Sistemul temperat Sauveur	418
5.5.G.3.	Sistemul temperat Mercator-Holder	420
5.5.G.4.	Sistemul temperat Paul von Janko	424
5.5.G.5.	Sistemul acustic propus de Wesley Woolhouse	425
5.5.G.6.	Sistemul egal temperat	436
5.5.H.	Sistemele bizantine	444
5.5.I.	Sistemele microtonale	467
5.5.J.	Clavecinul bine temperat	475
5.5.K.	Tipuri de microintervale în sistemele temperate	480
5.6.	Metode de analiza a sistemelor acustice muzicale	484
5.6.1.	Metode de unificare a sistemelor acustice muzicale	485
5.6.2.	Elemente de acustica fiziologica	493
5.6.3.	Consideratii istorice la metoda unificarii	497
5.6.4.	Aplicatie practica	498
5.6.5.	Aplicatie practica	502
6.	ANALIZA COMPUTERIZATA	509
6.1.	Structura calculatorului personal	512
6.2.	Utilizarea calculatorului în domeniul muzical	516
6.3.	Programarea calculatorului personal	547
6.4.	Setul de programe informatice muzicale "Apollo"	561
	ÎNCHETARE	573
	ANEXA	574
	BIBLIOGRAFIE SELECTIVA	578