

## STUDIUL ANALITIC AL SISTEMULUI DINAMIC AL CORZILOR VOCALE UMANE

### Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Mecanică

**autor ing. Maria – Laura JURCA**

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Nicolae HERIȘANU

luna 10 anul 2024

Prezenta teză de doctorat investighează și subliniază cele mai importante caracteristici în ceea ce privește dinamica corzilor vocale umane. Scopul acestei teze de doctorat vizează două direcții de cercetare, o direcție analitică, ce se bazează pe analiza comportamentului și a caracteristicilor vibrațiilor corzilor vocale umane prin investigarea modelelor matematice și mecanice de corzi vocale și o direcție exploratorie ce se referă la determinarea caracteristicilor fundamentale al vocii umane și influența acestora asupra calității vorbirii prin intermediul unui studiu experimental bazat pe înregistrarea vocilor umane ale pacienților cu afecțiuni ale aparatului fonoarticular și analiza acestora utilizând un program de analiză vocală. Astfel obiectivele urmărite în elaborarea prezentei lucrări de doctorat sunt:

- Explorarea noțiunilor anatomice implicate în procesul de producere al vocii umane, a caracteristicilor biomecanice ale aparatului fonoarticular, a fiziologiei și funcționării acestuia, precum și a afecțiunilor acestuia;
- Prezentarea contextului actual în ceea ce privește modelarea matematică și mecanică a corzilor vocale, precum și a determinării parametrilor fundamentali ai vocii umane;
- Investigarea și determinarea soluțiilor analitice ale unor modele mecanice de corzi vocale;
- Identificarea și dezvoltarea cunoștințelor în ceea ce privește caracteristicile și a parametri fundamentali ai vocii umane și analiza acestora prin intermediul programelor de analiză vocală;
- Determinarea experimentală a acelor parametri ale căror modificări pot duce la identificarea unei patologii la nivelul aparatului fonator uman;

Astfel, această lucrare urmează o succesiune logică a capitolelor, ce îmbină teoria cu etapele ce trebuie urmate în vederea modelării corzilor vocale din punct de vedere mecanic și matematic, dar și analiza vocală experimentală cu ajutorul parametrilor ce caracterizează o voce umană.

**Capitolul 1**, intitulat „**Introducere**”, în prima parte face referire la anatomia structurilor ce compun aparatul fonator, apoi la noțiuni fiziologice și biomecanice ale aparatului fonoarticular uman, dar și la diversele tipuri de afecțiuni ale corzilor vocale umane.

Din punct de vedere anatomic, aparatul fonoarticular uman este compus din plămâni, oasele și mușchii gâtului, cavitatea bucală și nazală și viscerele gâtului (faringe, laringe, respectiv trahee). Accentul cade pe organele gâtului, întrucât acestea conțin corzile vocale, ce reprezintă subiectul de interes al întregii lucrări.

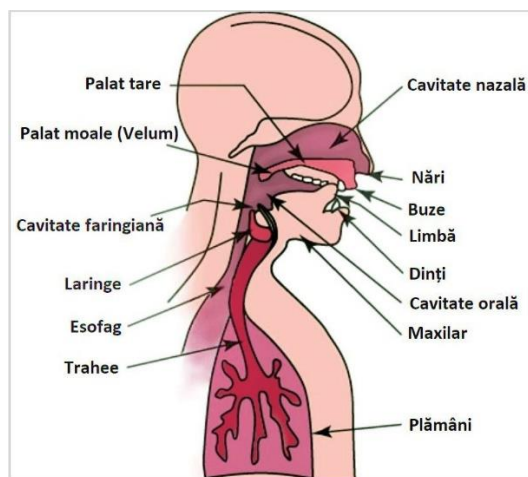


Fig. 1. Anatomia aparatului fonator uman

Componenta principală de interes și, de asemenea, componenta de bază a sistemului fonator este laringele. Acesta reprezintă un canal care răspunde ultimelor patru vertebre cervicale și este legat de celelalte viscere ale gâtului. Acesta face parte din căile respiratorii, protejează plămânii și, totodată, este componenta principală a aparatului fonator, fiind considerat cutia vocii [1], deoarece conține corzile vocale. În interiorul laringelui se găsesc corzile vocale, patru pliuri suprapuse, două în stânga și două în dreapta glotei, formate din mușchi (mușchiul vocal), țesut conjunctiv dens (numit lamina propria) care conferă flexibilitatea și vâscozitatea necesare pentru vibrația corzilor și epiteliul scuamos. La rândul său, lamina propria este compus din trei straturi, un strat superficial (spațiul lui Reinke), un strat intermediar și unul profund. Stratul intermediar, împreună cu cel profund, formează ligamentul vocal.

Pentru a înțelege modul în care se produce vocea umană, în continuare au fost prezentate câteva aspecte legate de fiziologia și biomecanica aparatului fonator.

Corzile vocale în timpul fonației sunt acționate de mușchi. Astfel, acestea pot fi ridicate, coborâte, apropiate, depărtate, întinse sau destinse prin modificarea poziției cartilajelor aritenoide de care sunt legate posterior, iar vibrațiile corzilor se produc cu ajutorul aerului expirat ce acționează asupra marginilor lor și sunt modulate de acțiunea mușchilor.

Producerea sunetelor și a vorbirii reprezintă un mecanism complex despre care se spune că implică două procese separate, unul care produce un sunet inițial (fonația) și altul care modifică sunetul inițial (articularea).

Vibrațiile corzilor vocale se produc datorită acțiunii aerului expirat din plămâni ce trece prin trahee în laringe, realizând deschiderea și închiderea periodică a corzilor vocale. Aceste vibrații se caracterizează prin anumite amplitudini și frecvențe care depind de mai mulți factori precum diametrul laringelui, viteza aerului sau grosimea corzilor.

Vibrația corzilor vocale este un proces ciclic (Fig.2.) în care, în prima fază, aerul încearcă să iasă din plămâni, presiunea subglotală crește, iar corzile vocale formează o îngustare a trecerii aerului. Când curentul de aer trece prin această îngustare, un vacuum parțial este creat, unind astfel membranele corzilor vocale pe linia de mijloc. Mai apoi, creșterea presiunii forțează corzile vocale să se îndepărteze de linia de mijloc în partea de jos, iar mai apoi valul de presiune urcă, eliminând un curent de aer, iar corzile vocale sunt complet separate. Corzile vocale se întorc mai întâi în partea de jos, ceea ce arată existența unui efect aerodinamic: spațiul din partea inferioară este mai îngust decât spațiul din partea superioară, deci din cauza vitezei, partea inferioară se închide mai întâi. Corzile vocale se întorc rapid la linia mediană. Cele două forțe care unesc corzile vocale sunt: elasticitatea țesuturilor și efectul Bernoulli.

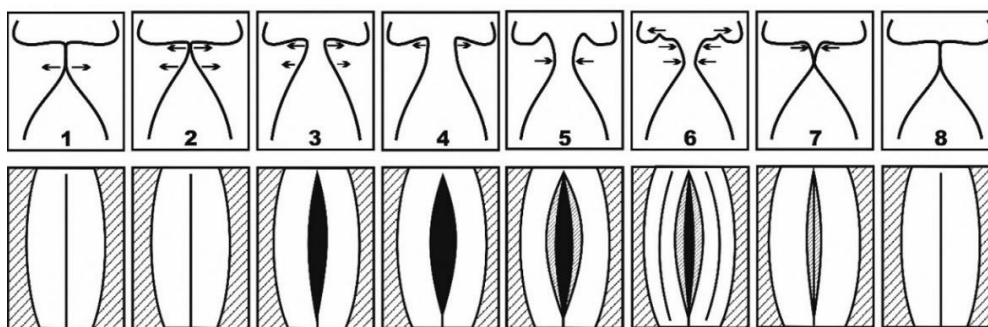


Fig. 2. Ciclu de vibrație al corzilor vocale [2]

Apariția tulburărilor sau modificărilor de orice fel la nivelul laringelui, a corzilor vocale, a aparatului respirator uman sau a oricăror componente ce fac parte din aparatul fonator uman poate duce la apariția diverselor afecțiuni sau patologii ale acestei structuri din corpul uman [3].

Patologiile de interes din cadrul acestei teze de doctorat se referă la: ***laringita cronică pseudomaximatoasă***, numită și ***edemul lui Reinke*** (datorită acumulării de lichid în mucoasă și inflamarea stratului superficial al acestora, sunt afectate masa și rigiditatea corzii vocale, astfel afectând diferite caracteristici ale frecvenței fundamentale [4]); ***polipi vocali*** (tumori benigne, ce apar pe membrana corzilor vocale, generează vibrații neregulate ale acestora și împiedică închiderea completă a glotei [5]); ***paralizia*** (fixarea corzilor, în poziție paramediană, ceea ce, pe lângă afectarea vorbirii, compromite și procesul de respirație); ***tumori maligne laringiene*** sau ***cancerul laringian*** (fonația este afectată indiferent de etajul în care se află tumora, iar în cazul în care tumora apare la nivelul corzilor vocale, aceasta cauzează pierderea elasticității corzilor vocale, rigidizarea acestora și reducerea spațiului glotic, datorită masei suplimentare pe coarda vocală).

**Capitolul 2**, denumit „**Stadiul actual al cercetărilor**”, aduce în prim plan diferite lucrări și studii științifice realizate până în prezent, de cercetători din întreaga lume, privind modelarea matematică și mecanică a corzilor vocale și metodele de analiză vocală prin determinarea parametrilor ce caracterizează o voce umană în vederea identificării patologiilor la nivelul aparatului fonoarticulator.

În principal, modelele matematice și mecanice sunt bazate pe sisteme masă-arc-amortizor, care analizează comportamentul și caracteristicile vibrațiilor corzilor vocale umane; acestea au ca punct de pornire un model de bază (Fig.3.), cu o singură masă pentru corzile vocale, în care  $m$  = masa corzii vocale,  $k$  = rigiditatea arcului,  $c$  = amortizarea,  $x$  = deplasarea corzii vocale, iar  $F(t)$  este funcția ce conduce sistemul și este dependentă de timp.

Mai apoi au fost dezvoltate sisteme bazate pe împărțirea corzilor în porțiuni mai mici, respectiv modele cu două sau mai multe mase. În ceea ce privește parametrii esențiali ai vocii, aceștia sunt utili în descrierea vocii umane și identificarea patologiilor de la nivelul tractului vocal.

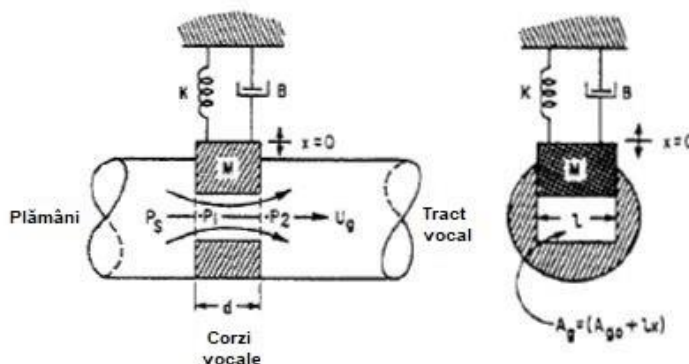


Fig. 3. Model cu o singură masă pentru corzile vocale [6]

Un prim model pentru corzile vocale (Fig.3.) a fost dezvoltat în lucrarea [6]. Acesta este un model de bază utilizat în numeroase alte cercetări în domeniul dinamicii corzilor vocale. În acest studiu, corzile vocale au fost considerate simetrice, iar parametri utilizați în cazul acestui model matematic corespund parametrilor fiziologici ai tensiunii corzilor vocale și ai presiunii subglotale.

În acest studiu, autorii au subliniat următoarele rezultate: viteza debitului de aer depinde de presiunea subglotală și de configurația tractului vocal, care poate influența forma de undă și frecvența fundamentală a vocii; pentru a reproduce activitatea normală a laringelui uman, vibrațiile initiale ale corzilor vocale au fost considerate neregulate, ceea ce a dus la observația că starea de echilibru a corzilor se atinge în aproximativ al patrulea ciclu de vibrație, iar deplasarea masei acestora se poate observa atât în deschiderea, cât și în închiderea glotei; înălțimea vocii depinde de diferite presiuni subglotale, de tensiuni ale corzilor vocale, dar și de configurația tractului vocal.

În alte două studii dezvoltate de diverși cercetători, s-a urmărit obținerea unor voci sintetizate folosind modelele matematice existente (cu una și două mase) pentru vocile de bărbat, femeie și copil. În primul studiu, [7], s-a utilizat modelul matematic cu o singură masă pentru corzile vocale, prezentat anterior, iar în al doilea, [8], au utilizat modelul cu două mase dezvoltat în 1972 de Ishizaka and Flanagan (Fig.4.).

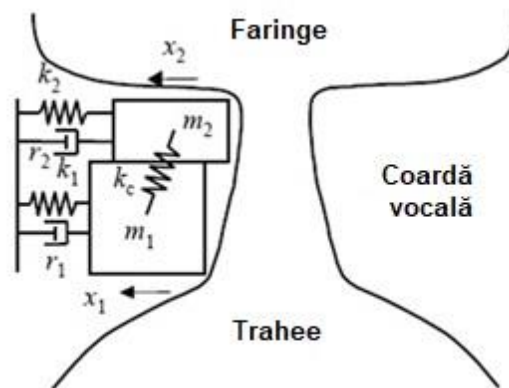


Fig. 4. Model mecanic cu două mase pentru corzile vocale [8]

Aceste voci sintetizate au fost percepute ca fiind reale doar în cazul unei presiuni subglotale variabile. Acest lucru poate fi explicat prin faptul că, în mod natural, în timpul fonației sau respirației, presiunea subglotală a aerului nu sare niciodată de la 0 la o valoare constantă.

O altă concluzie obținută a fost aceea că dacă se reduce dimensiunea laringelui, crește frecvența fundamentală. Acest lucru a fost demonstrat prin identificarea frecvenței fundamentale a vocilor sintetizate, pentru bărbat, femeie și copil, în cazul copilului rezultând o frecvență fundamentală considerabil mai mare, iar o ultimă concluzie s-a referit la faptul că dinamica oscilației corzilor vocale poate fi studiată cu ajutorul modelelor simple pentru corzile vocale, dar nu poate fi descrisă în totalitate.

În cercetarea [9], s-a realizat o trecere în revistă a modelelor matematice și mecanice existente pentru corzile vocale și au fost prezentate sugestii pentru îmbunătățirea modelelor existente, pe baza rezultatelor anterioare.

Astfel, o primă sugestie s-a referit la introducerea proprietăților neliniare ale corzilor vocale, nu doar a celor liniare, ceea ce înseamnă că ecuațiile diferențiale ar avea și termeni neliniari, iar pentru rezolvarea acestora trebuie dezvoltate nu numai metode analitice numerice, ci și aproximative. O altă sugestie s-a referit la analiza mișcării corzilor vocale pe trei direcții (laterală, longitudinală și verticală), în vederea unei interpretări mai bune a vibrațiilor corzilor

vocale, iar o ultima sugestie a făcut referire la analiza mai în detaliu a stabilității vibrațiilor corzilor vocale, având în vedere faptul că instabilitățile și mișcarea neregulată a corzilor vocale sunt tipice pentru multe tulburări ale vocii.

Pe lângă numeroasele studii referitoare la modelarea matematică pentru corzile vocale, există o mare varietate de studii bazate pe determinarea parametrilor ce caracterizează vocea umană și sunt utilizați pe scară largă în identificarea diverselor patologii ale tractului vocal. Printre cele mai însemnate cercetări pe acest subiect se numără cele referitoare la parametrii Jitter și Shimmer. Atât Jitter, cât și Shimmer reprezintă vibrații neregulate ale corzilor vocale, care în funcție de nivelul lor procentual pot indica prezența unei afecțiuni la nivelul tractului vocal.

Printre principalele studii vizate în cadrul tezei de doctorat de numără [10] și [11], în care autorii au realizat compararea parametrilor Jitter și Shimmer între un grup de subiecți cu voci patologice și un grup de subiecți fără patologii ale vocii. Compararea a fost realizată în raport cu un nivel standard al valorilor parametrilor. În vederea comparării, a fost realizată înregistrarea vocală a pacienților și analiza parametrilor cu un program de analiză vocală. S-a ajuns la următoarele concluzii: există diferențe semnificative ale valorilor parametrilor între cele două grupuri, iar pentru grupul cu voci patologice apare o instabilitate în susținerea mai îndelungată a unor sunete, din punct de vedere al frecvențelor și intensității sunetului. Acest tip de metodă de investigare în vederea identificării patologiilor aparatului fonator este una obiectivă și neinvazivă.

Un alt studiu, [12], s-a bazat pe determinarea variației nivelului parametrilor Jitter și Shimmer în raport cu variația frecvenței fundamentale. Determinarea a fost realizată pe un lot de 60 de subiecți, iar rezultatele au arătat că pe măsură ce crește frecvența fundamentală, valorile parametrilor Jitter și Shimmer scad, iar dacă se poate crește frecvența fundamentală, calitatea vocii poate fi îmbunătățită.

**Capitolul 3, „Modelarea matematică a corzilor vocale”** prezintă câteva studii personale în ceea ce privește metodele de modelare matematică pentru studiul vibrațiilor corzilor vocale și investigarea câtorva din modele mecanice dezvoltate până în prezent pentru corzile vocale. Modelările s-au bazat pe o metodă al cărei scop este determinarea soluțiilor analitice aproximative ale problemelor diferențiale neliniare, și anume, OHAM (Optimal Homotopy Asymptotic Method). Eficiența și acuratețea acestei metode s-a demonstrat prin corelarea rezultatelor soluției analitice, obținute cu OHAM, cu integrarea numerică.

Într-o primă abordare am investigat un model matematic propus în lucrarea [13]. Pentru acesta am considerat cozile vocale ca fiind simetrice și că mișcarea țesuturilor se realizează doar pe direcție orizontală. Ecuația guvernanta de mișcare 3.1 este o ecuație neliniară, pentru care am aplicat metoda OHAM.

$$M\ddot{x} + B(1 + \beta x^2)\dot{x} + Kx = P_g \quad (3.1)$$

Metoda OHAM implică mai multe etape, începând cu impunerea condițiilor inițiale și transformarea termenilor ecuației guvernante astfel încât aceasta să devină o ecuație simplificată, de forma ecuației 3.2.

$$\ddot{x} + 2\mu\dot{x} + \alpha x^2\dot{x} + \omega^2 x + K_0 = 0 \quad (3.2)$$

Apoi se identifică un operator liniar și unul neliniar, urmând ca soluția aproximativă să fie determinată din ecuația diferențială liniară conform ecuației 3.3, în care se poate observa faptul că intervine o funcție auxiliară  $H(C_i, t)$  dependentă de timp și de trei parametri de control a convergenței. Acești parametri sunt inițial necunoscuți și se determină prin metode matematice riguroase, iar cu cât numărul acestora este mai mare, cu atât va fi mai precisă soluția, dar calculele devin mult mai riguroase.

$$\ddot{x}_1 + 2\mu\dot{x}_1 + \omega^2 x_1 = N(x_0)H(C_i, t) \quad (3.3)$$

Forma finală a soluției analitice OHAM se regăsește în ecuația 3.4.

$$x_1(t) = \frac{(\omega^2 - 2\mu^2)C_1 - 2\mu\sqrt{\omega^2 - \mu^2}C_2}{9\omega^4} \left( e^{-\mu t} \cos\sqrt{\omega^2 - \mu^2}t - e^{-3\mu t} \cos 3\sqrt{\omega^2 - \mu^2}t \right) + \\ + \frac{2\mu(\omega^2 - 2\mu^2)C_1 + \sqrt{\omega^2 - \mu^2}(3\omega^2 - 2\mu^2)C_2}{9\omega^4\sqrt{\omega^2 - \mu^2}} \left( e^{-\mu t} \sin\sqrt{\omega^2 - \mu^2}t - e^{-3\mu t} \sin 3\sqrt{\omega^2 - \mu^2}t \right) + \\ + \frac{K_0 C_3}{\omega^2} \left[ 1 - e^{-\mu t} \cos\sqrt{\omega^2 - \mu^2}t - \frac{\mu \sin\sqrt{\omega^2 - \mu^2}t}{\sqrt{\omega^2 - \mu^2}} \right] \quad (3.4)$$

Pentru a sublinia eficiența și acuratețea acestei abordări, am dezvoltat un exemplu numeric bazat pe un set de parametri fizici reali din literatura de specialitate. Precizia metodei OHAM, în acest caz, este subliniată în Fig.5 și Fig.6, în care am reprezentat o comparație grafică între soluția analitică și rezultatele integrării numerice, atât pentru soluția aproximativă  $x(t)$ , cât și pentru derivata în raport cu timpul  $x'(t)$ .

Linia roșie continuă reprezintă rezultatele integrării numerice, în timp ce linia albastră punctată reprezintă soluția analitică OHAM.

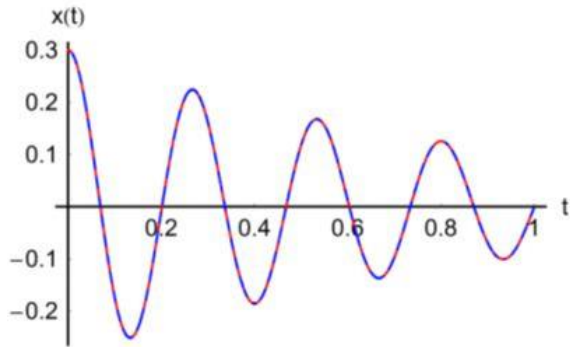


Fig. 5. Compararea rezultatelor soluției aproximative (soluție analitică - albastru, soluție numerică - roșu)

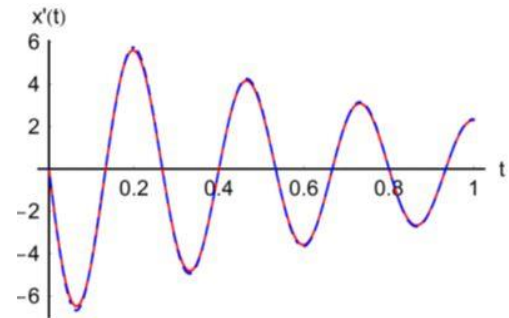


Fig. 6. Compararea rezultatelor derivatei de ordinul întâi pentru soluția aproximativă (soluție analitică - albastru, soluție numerică - roșu)

Suprapunerea soluției analitice OHAM cu integrarea numerică, relevă o acuratețe excelentă și validează eficiența și aplicabilitatea metodei propuse de soluționare.

Un alt model ales în vederea investigării prin metoda OHAM a fost tot un model simplu, neliniar, de coardă vocală, dezvoltat în lucrarea [14]. Aici, ecuația guvernantă de mișcare se regăsește sub forma ecuației 3.5, pentru care am urmat aceleași etape ale metodei OHAM.

$$m\ddot{x} + r\dot{x} + kx + ax\dot{x} = F \quad (3.5)$$

Și în acest caz, compararea soluției analitice cu un exemplu numeric a dus la concluzia că suprapunerea grafică a acestora, cum se poate observa în Fig.7 și Fig. 8 demonstrează încă o dată precizia acestei metode de rezolvare a ecuațiilor diferențiale neliniare.

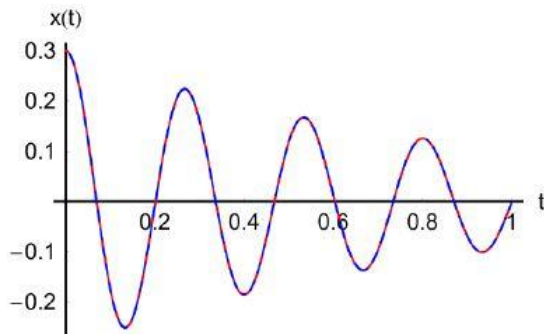


Fig. 7. Compararea rezultatelor soluției aproximative (soluție analitică - albastru, soluție numerică - roșu)

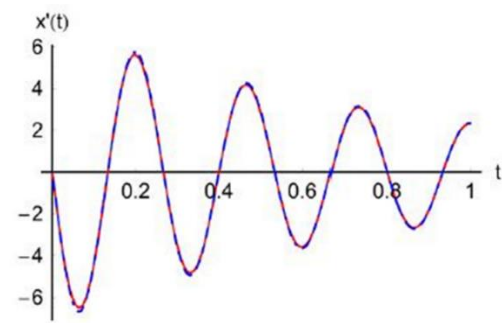


Fig. 8. Compararea rezultatelor derivatei de ordinul întâi pentru soluția aproximativă (soluție analitică - albastru, soluție numerică - roșu)

Modelul de undă mucoasă este al treilea tip model investigat cu metoda OHAM. Acesta implică oscilații de amplitudine mică ale corzilor vocale și reprezintă mișcarea oscilatorie ca o undă de suprafață care se propagă în mucoasă, pe direcția fluxului de aer. Modelul ales a fost dezvoltat de Titze în [8], iar ecuația guvernantă a mișcării este prezentată în ecuația 3.6. Și în cazul acestui model, conform Fig. 9 și Fig. 10, acuratețea și eficiența metodei OHAM este una excelentă, demonstrată prin suprapunerea perfectă a soluției analitice cu integrarea numerică.

$$m\ddot{x} + r\dot{x} + kx = dl_g \frac{2\tau P_s \dot{x}}{a + x + \tau \dot{x}} \quad (3.6)$$

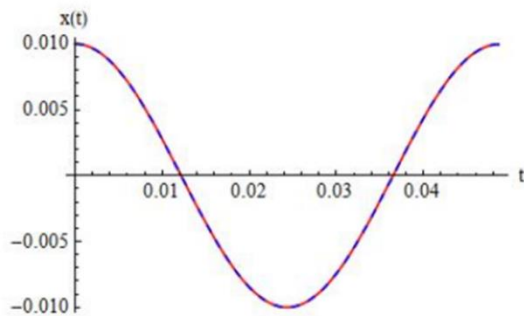


Fig. 9. Compararea rezultatelor soluției aproximative (soluție analitică - albastru, soluție numerică - roșu)

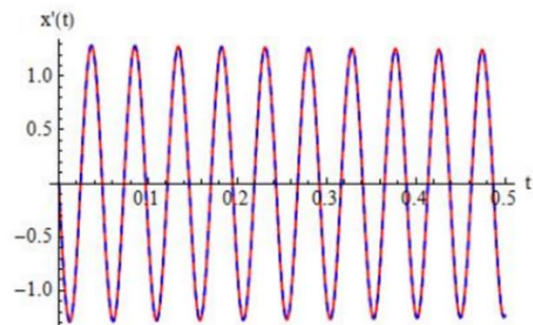


Fig. 10. Compararea rezultatelor derivatei de ordinul întâi pentru soluția aproximativă (soluție analitică - albastru, soluție numerică - roșu)

**Capitolul 4, intitulat „Înregistrarea și analiza vocală”** cuprinde în primul rând un studiu personal, elaborat în vederea trecerii în revistă a unora dintre cele mai importante studii în ceea ce privește utilizarea parametrilor Jitter și Shimmer pentru identificarea afecțiunilor de la nivelul laringelui.

În principal, în cazul tuturor studiilor selectate, accentul a căzut pe câteva dintre cele mai importante caracteristici ale vocii umane, adică frecvență fundamentală, Jitter și Shimmer, care au fost determinate din înregistrări vocale ale subiecților, utilizând diverse programe de analiză vocală. În cadrul majorității studiilor a fost realizată comparația între grupuri de persoane cu voci sănătoase, cu grupuri de persoane cu anumite patologii ale vocii asociate, cum ar fi balbismul [11], [15], leziuni ale laringelui [10], polip de coardă vocală [16], edem Reinke [17], etc., pe când, în cazul celorlalte lucrări au fost utilizate înregistrări ale unui singur grup de subiecți, pentru care au fost determinați parametrii vocii [12], [18], [19]. Rezultatele au subliniat atât diferențe clare între vocile patologice și cele sănătoase, cât și eficiența programelor de analiză vocală, fiind considerate metode simple și neinvazive de identificare a unor posibile

afecțiuni ale aparatului fonator uman.

În cadrul aceluiași capitol a urmat descrierea programului de analiză vocală utilizat în secțiunea experimentală (Praat), a caracteristicilor vocalelor, a parametrilor fundamentali în descrierea vocii umane (intensitate, timbru vocal, timp de fonație, Jitter, Shimmer, HNR, pauze vocale), dar și descrierea proceselor de articulare și fonație a sunetelor umane.

Din înregistrările sunetelor vocale umane, prin analiza acustică este posibilă identificarea și evaluarea tulburărilor de voce. Acest tip de analiză se realizează cu ajutorul programelor de analiză vocală, ce permit extragerea celor mai relevanți parametri acustici.

Praat [20] este unul dintre cele mai utilizate programe de analiză vocală la nivel mondial, ce poate prelucra o gamă largă de voci și permite identificarea și extragerea caracteristicilor fundamentale ale unei voci umane, precum

- *înălțimea sunetului (frecvența fundamentală  $F_0$ )* - numărul de cicluri de vibrație produse de corzile vocale pe secundă). Conform literaturii de specialitate, femeile au o înălțime tonală medie de aproximativ 260 Hz și poate varia în intervalul 200-500 Hz, iar bărbații au o frecvență medie de 130 Hz, dar poate varia în intervalul 100-300 Hz și copii peste 250 Hz [21].
- *intensitatea sunetului (volumul vocii)* - se măsoară în decibeli și se caracterizează prin amplitudinea undei sunetului emis de vocea umană.
- *timbrul vocal* - combinația sunetului fundamental cu armonicile sale [21]. Acestea din urmă se referă la frecvențele de rezonanță ale tractului vocal, numite *formanți* (un timbru grav este caracterizat de formanții inferiori, formanții înalți dau claritatea vocii, iar cei mijlocii caracterizează un timbrul nazal).
- *Jitter* - variația de la ciclu la ciclu a frecvenței fundamentale, în perioade succesive de vibrație a corzilor vocale [21]. O valoare procentuală mai mare a parametrului Jitter apare în cazul mai multor patologii ce pot afecta aparatul fonator uman, iar nivelul până la care pot apărea perturbații în frecvența unui sunet variază între 0,5 și 1% conform numeroaselor studii realizate până în prezent.
- *Shimmer* - variația amplitudinilor perioadelor consecutive din semnal. Valoarea crescută a acestui parametru apare în cazul în care se modifică masa corzilor vocale sau dacă apar anumite leziuni pe corzile vocale, ceea ce poate duce la incapacitatea acestora de a menține o vibrație constantă pe parcursul fonației. Ca și în cazul parametrului Jitter, există un nivel de prag de 3,81% pentru Shimmer conform literaturii de specialitate.
- *raportul armonic-zgomot (HNR)* - raportul dintre armonici și componentele neperiodice dintr-un sunet. Cu cât HNR are o valoare mai ridicată, cu atât crește calitatea vocii, iar dacă HNR are o valoare mai mică de 20 dB [20], atunci acesta indică prezența unei patologii la nivelul aparatului fonator.

Pe lângă caracteristicile esențiale prezentate anterior, în vederea evaluării unei voci trebuie înțelese procesele principale implicate în producerea vorbirii:

- *articularea sunetelor* - întregul proces prin care visceralele ce aparțin aparatului fonoarticular sunt legate între ele și implicate în producerea și modelarea unei voci. Din procesul articular fac parte uvula (omșorul), palatul dur, palatul moale, dinții, crestele alveolare și buzele.
- *procesul de fonație* - implică celelalte viscere ale aparatului fonator și reprezintă procesul prin care aerul expirat din plămâni trece prin laringe și este modulat de către corzile vocale.

Cele două procese depind unul de celălalt în producerea unui sunet. Sunetele produse de vocea umană se pot împărți în tonuri sau zgomote, în funcție de caracterul periodic, respectiv neperiodic al vibrației produse de corzile vocale. Vibrațiile periodice ale corzilor sunt reprezentate în principal de vocale, iar cele neperiodice sunt reprezentate de consoane.

Sunetele de interes în această teză de doctorat sunt vocalele, care pot fi clasificate în



funcție de trei criterii: gradul de deschidere al cavității orale (deschise, semideschise, închise), locul de articulare (anterioare, centrale, posterioare) și rotunjimea buzelor (rotunjite, nerotunjite). Ținând cont de această clasificare, pentru a reprezenta grafic sistemul vocalic, conform Alfabetului Fonetic Internațional [22], s-a realizat o schematizare a celor 7 vocale ale limbii române, în funcție de frecvențele primilor doi formanți ai fiecărei vocale (primul formant este invers proporțional cu înălțimea vocalei, iar cel de-al doilea formant este legat de locul de articulare al vocalei, adică gradul de anterioritate sau posterioritate al vocalelor).

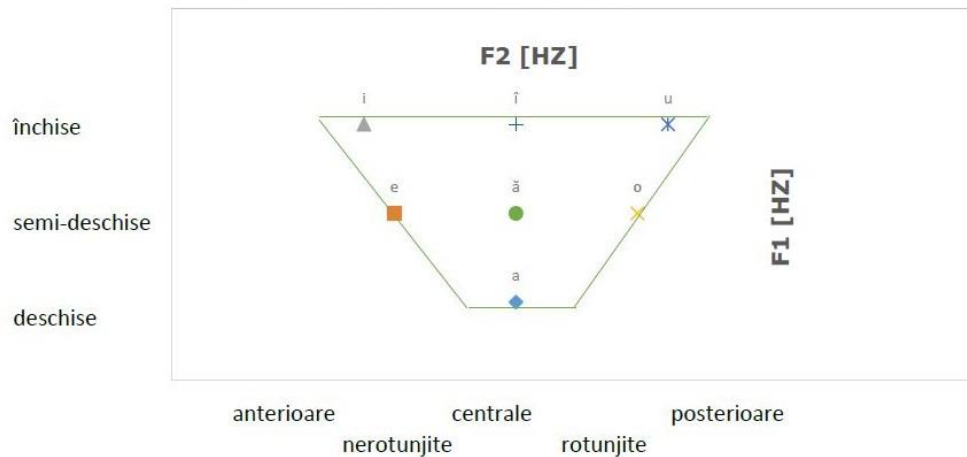


Fig. 11. Reprezentarea schematică a vocalelor

**Capitolul 5, intitulat „Determinări experimentale în vederea identificării parametrilor utilizați în analiza vocală”** a vizat determinarea experimentală parametrilor utilizați în analiza vocală, în vederea identificării patologiilor ce pot apărea la nivelul aparatului fonator. Acest capitol descrie protocolul de înregistrare, extragerea și prelucrarea datelor colectate și realizarea de diferite grafice și tabele care să sublinieze eficiența utilizării unei metode tehnice neinvazive de detectare a patologiilor, utilizând un software de analiză vocală.

Astfel am realizat un studiu bazat pe date colectate din cadrul Spitalului Clinic Municipal de Urgență Timișoara (SCMUT), aprobat prin acordul scris al conducerii spitalului și avizele favorabile ale șefilor de secție de Otorinolaringologie (O.R.L) și Radioterapie.

Colectarea datelor și înregistrarea vocală a pacienților a avut loc doar în urma completării și semnării de către pacient a unui acord liber consimțit privind participarea la cercetarea didactică medicală în cele două secții ale SCMUT, care prevede respectarea utilizării și prelucrării datelor cu caracter personal, dar și faptul că pacienții au luat la cunoștință informațiile cu privire la scopul și procedura utilizată, durata, riscuri, etc.

Datele de interes colectate și utilizate se referă la vârsta pacienților, diagnostic, gen (feminin/masculin) și obiceiuri de fumat. Au fost selectați doar pacienții diagnosticați cu forme severe de laringită cronică, tumori maligne ale laringelui, ale corzilor vocale, polipi ai corzilor vocale și paralizia corzilor vocale, iar condiția ca aceștia să participe la acest studiu a fost să fie în perioada preoperatorie și internați în una din secțiile de Radioterapie sau Otorinolaringologie ale Spitalului Clinic Municipal de Urgență Timișoara.

Astfel, am realizat înregistrarea audio a unui lot de pacienți format din 14 barbati și 8 femei, toți fumători, cu vârste cuprinse între 29 și 75 de ani, diagnosticați cu patologii cunoscute ale aparatului fonator uman. Toate înregistrările au fost realizate direct în programul de analiză vocală Praat prin intermediul unui microfon unidirecțional. Pacienții au stat în poziție așezată și au fost instruiți să poziționeze microfonul în dreptul gurii, la o distanță de aproximativ 10 cm (4 degete) față de gură (Fig.13) și au fost rugați să emită pe rând vocalele [a], [e], [i], [o] și [u], la o frecvență și intensitate obișnuită (confortabilă) și să le susțină un timp cât mai îndelungat.



Fig. 12. Protocol de înregistrare

În vederea analizei vocale, în această lucrare de doctorat am ales utilizarea următoarelor caracteristici ale vocii: frecvența fundamentală,  $F_0$ ; primii doi formanți ( $F_1$ ,  $F_2$ ), parametrul Jitter (măsurat în procente), parametrul Shimmer (măsurat în procente) și raportul armonice-zgomot (HNR);

Pentru identificarea unei posibile afecțiuni la nivelul aparatului fonator uman, am ales compararea rezultatelor cu valori normative identificate în studii anterioare în acest domeniu.

Au fost realizate reprezentările schematizate (hărților) vocalelor corespunzătoare pacienților înregistrați și comparate cu schematizarea vocalelor pentru voci sănătoase (realizată cu valori ale primilor doi formanți identificate în [23]). În cazul tuturor tipurilor de patologii au fost identificate diferențe semnificative în ceea ce privește înălțimea și locul de articulare al vocalelor, cele mai pregnante diferențe fiind observate în cazul în care există două patologii ale laringelui asociate, Fig. 14 (în acest caz, polip și tumoră malignă de corzi vocale).

Tabel 1.  $F_1$  și  $F_2$  [Hz] în cazul asocierii a două patologii: polip și tumoră de corzi vocale

| Vocală | $F_1$ [Hz] | $F_2$ [Hz] | Deviație standard |            |
|--------|------------|------------|-------------------|------------|
|        |            |            | $F_1$ [Hz]        | $F_2$ [Hz] |
| a      | 779.1118   | 2271.9989  | 70.8882           | -661.9989  |
| e      | 337.0796   | 2130.1855  | 52.9204           | 169.8145   |
| i      | 258.9281   | 2311.4511  | -18.9281          | 88.5489    |
| o      | 396.2124   | 1175.4113  | -36.2124          | -535.4113  |
| u      | 432.6391   | 1641.2589  | -182.6391         | -1046.259  |

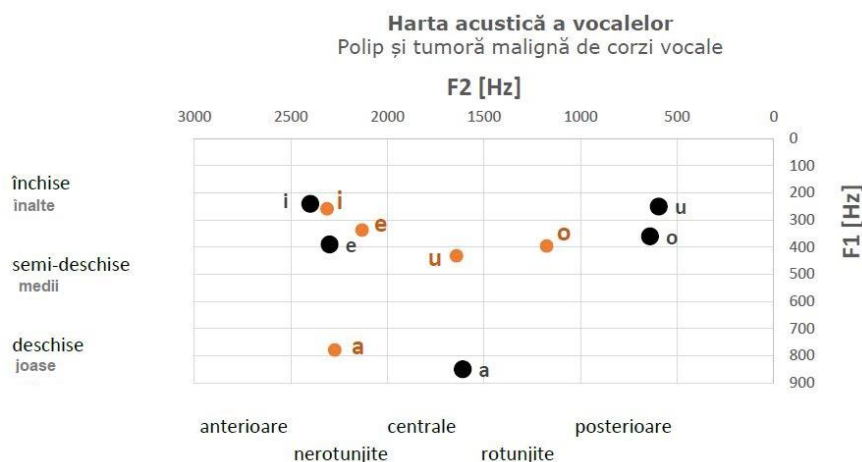


Fig. 13. Harta acustică a vocalelor în cazul asocierii a două patologii: polip și tumoră de corzi vocale (● - voce sănătoasă, ● - voce patologică)

Afectarea locului de ariculare al vocalelor se poate datora maselor suplimentare pe care

atât polipul, cât și tumora le adaugă masei corzilor vocale, astfel afectând procesul de trecere al aerului prin glotă și provocând o instabilitate a mișcărilor corzilor, dar și a celorlalte structuri implicate în procesul de fonație.

În acest caz particular, cele mai semnificative deviații se regăsesc în cazul vocalelor [a], [o] și [u], pentru care se observă o creștere substanțială a lui  $F_2$ , astfel că vocala [a], dintr-o vocală centrală devine o vocală anterioară (proprietățile mușchiului lingual sunt afectate și acesta nu mai păstrează o poziție intermediară). Vocala [o] rămâne rotunjită și cu mușchiul lingual în poziție posterioară, dar se mută într-o poziție centrală. Pentru vocala [u], creșterile mari ale frecvențelor ambilor formanți duc la schimbarea completă a localizării acestei vocale, astfel aceasta devine o vocală centrală, nerotunjită și semi-deschisă.

Realizarea hărților vocalelor în raport cu diverse afecțiuni este o metodă utilă prin care se poate realiza cu succes analiza vocală și indicarea posibilității de apariție a unei afecțiuni.

În același timp, există și alți câțiva parametri care pot duce la identificarea rapidă și facilă a afecțiunilor aparatului fonoarticular uman. În prezenta lucrare de doctorat, determinarea acestor caracteristici s-a realizat prin extragerea parametrilor direct din programul de analiză Praat și prelucrarea acestora în vederea determinării valorilor medii în funcție de patologii existente și în raport cu genul persoanei.

Obiectivul principal a fost identificarea caracteristicilor vocale pentru pacienții diagnosticați cu tumoră malignă de laringe, aceștia reprezentând majoritatea pacienților din lot.

O primă caracteristică analizată a fost **frecvența fundamentală**. Pentru a putea compara valorile vocilor patologice, am utilizat valori normative medii ale frecvenței fundamentale propuse în [24]. Astfel rezultatele, atât în cazul subiecților de gen feminin, cât și în cazul celor de gen masculin, au subliniat faptul că acest tip de patologie laringiană provoacă diverse modificări ce țin atât de structura corzilor vocale, cât și de proprietățile mecanice ale țesutului acestora, cum ar fi: *modificarea masei corzilor vocale* (tumorile introducând o masă suplimentară pe coarda vocală) și rezultând în scăderea frecvenței fundamentale; *apariția unor modificări în tensiunea corzilor vocale*, în cazul în care tumorile afectează mușchii ce reglează această tensiune, provocând, de asemenea, o scădere în frecvență; *forma și dimensiunile tumorilor sau inflamarea țesutului corzilor vocale modifică forma anatomică de bază a corzilor* (se modifică grosimea și lungimea acestora), ducând la modificări ale frecvenței fundamentale.

De asemenea, în cazul tuturor pacienților diagnosticați cu tumoră malignă de laringe au rezultat valori ale parametrului Jitter ce depășesc intervalul normativ considerat (0,5-1%). Acest lucru poate fi observat în Fig.14, care ilustrează perturbațiile în frecvență ale semnalului în cazul lotului de pacienți cu tumori laringiene. Aceste valori crescute pot fi cauzate de pierderea elasticității corzilor vocale, ducând chiar și până la rigidizarea acestora.

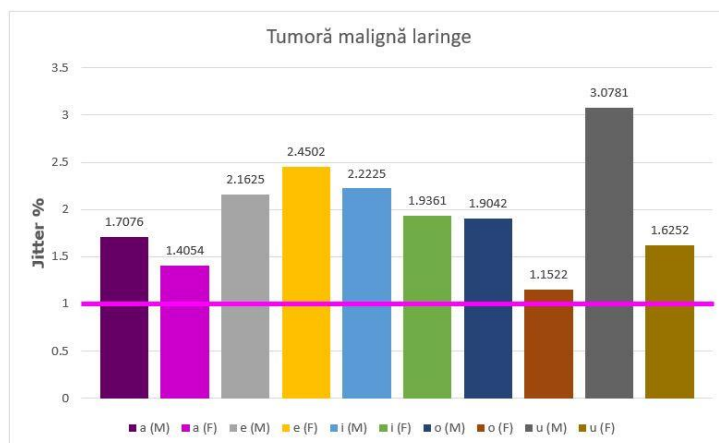


Fig. 14. Jitter [%] în funcție de gen, în tumora malignă de laringe (M - masculin, F-feminin, — limita superioară a parametrului Jitter pentru voci sănătoase)

Și în ceea ce privește parametrul Shimmer, atât în cazul pacienților de gen feminin, cât și în cazul celor de gen masculin a fost evidentă diferența între valorile determinate ale acestui parametru și valoarea de prag de 3%. Cele mai semnificative diferențe au apărut în cazul pacienților de gen masculin, așa cum se poate observa și în Fig.15.

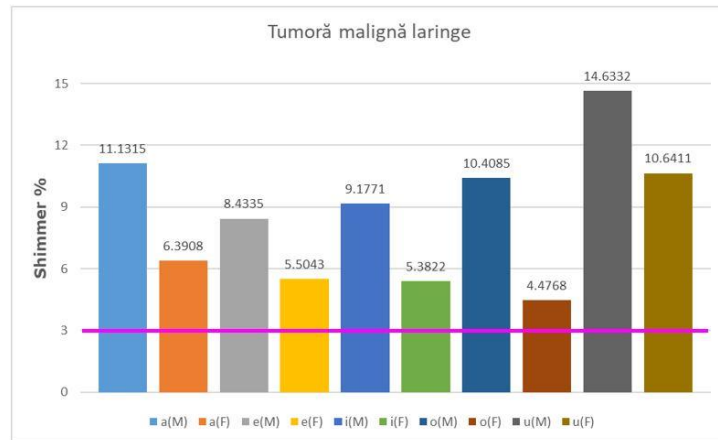


Fig. 15. Shimmer [%] în funcție de gen, în tumora malignă de laringe (— limita superioară a parametrului Shimmer pentru voci sănătoase)

Aceste perturbații în amplitudine ale semnalului (Shimmer) sunt influențate de leziunile existente pe corzile vocale și reducerea rezistenței glotale și se poate corela cu o voce care șuieră și prezența unui zgomot suplimentar[25].

Un alt parametru caracteristic și esențial pentru analiza unei voci umane este parametrul HNR. Acest raport dintre energia acustică a armonicilor și non-armonicilor este influențat și de celelalte caracteristici abordate (Jitter, Shimmer, F<sub>0</sub>). În contrast cu parametri prezentați anterior, cu cât HNR are o valoare mai ridicată, cu atât crește armonicitatea vocii (HNR > 20 dB). În mod natural, în timpul fonației spațiul glotal se îngustează mai puțin la bărbați decât la femei, ceea ce înseamnă că, în cazul bărbaților, nivelul armonicilor este mai scăzut, iar zgomotul devine mai puternic. Acest lucru este observat și în cazul lucrării de față, pentru pacienții diagnosticați cu cancer laringian. Astfel, pentru femei au existat valori mai ridicate pentru HNR decât în cazul bărbaților, dar sub limita de 20 dB pentru voci sănătoase.

Determinarea acestor caracteristici esențiale ale vocii umane, prin extragerea acestora din programe de analiză vocală poate fi o tehnică neinvazivă de mare utilitate în identificarea patologiilor ce pot afecta vocea umană.

**Capitolul 6, intitulat „Concluzii generale și contribuții personale”** cuprinde concluziile generale ale tezei de doctorat, contribuțiile personale în realizarea acestei lucrări, precum și posibile direcții de dezvoltare în domeniul vibrațiilor corzilor vocale umane.

Cercetarea de față a subliniat, în primul rând, unele dintre cele mai importante aspecte în vederea înțelegerii a modului în care se produce vocea umană, pornind de la cunoașterea structurilor anatomice implicate în procesul de vorbire și interacțiunea dintre ele, atât din punct de vedere biomecanic, cât și fiziologic, până la descrierea afecțiunilor de interes (tumori maligne, paralizie, edem Reinke, polipi vocali).

Un alt aspect de mare importanță în cazul acestei lucrări a fost studiul personal în ceea ce privește analiza vocii umane și a modelării matematice a corzilor vocale, în vederea corelării și comparării datelor din partea experimentală, cu cele din literatura de specialitate.

În această teză de doctorat am dorit să utilizez o metodă simplă și neinvazivă pentru identificarea posibilelor patologii ale aparatului fonator, care afectează procesul de vorbire. Pentru aceasta am realizat determinări experimentale, pe care mai apoi le-am prelucrat în vederea realizării unor reprezentări grafice esențiale în demonstrarea eficienței acestei metode de identificare a tulburărilor de voce.

Contribuțiile personale evidențiază, în principal: eficiența și utilitatea modelării matematice și mecanice prin investigarea acestora cu metoda OHAM, dar și importanța determinării experimentale a caracteristicilor principale ale vocii umane în identificarea patologiilor și tulburărilor care pot să apară în tractul vocal și compararea acestora cu nivele normative.

În final, direcțiile viitoare de cercetare includ: dezvoltarea și investigarea a mai multor modele matematice pentru corzile vocale, dezvoltarea continuă a metodei experimentale de identificare a patologiilor, compararea rezultatelor experimentale din perioada preoperatorie a pacienților cu cele din perioada post-operatorie, observarea modului de oscilație al corzilor vocale și întregul proces de fonație prin utilizarea stroboscopiei, dar și modelarea tridimensională a corzilor vocale și analiza cu element finit în cazul apariției unei mase suplimentare pe corzi (spre exemplu în cazul apariției unei tumori sau a unui polip pe corzile vocale).

## Bibliografie:

- [1] T. Taylor, „The Respiratory System”, Innerbody Research 1997 - 2024. Data accesării: 15 aprilie 2021. Disponibil la: <https://www.innerbody.com/anatomy/respiratory>
- [2] J. G. Švec, H. K. Schutte, C. J. Chen, și I. R. Titze, „Integrative Insights into the Myoelastic-Aerodynamic Theory and Acoustics of Phonation. Scientific Tribute to Donald G. Miller”, *Journal of Voice*, vol. 37, nr. 3, pp. 305–313, mai 2023, doi: 10.1016/j.jvoice.2021.01.023.
- [3] L. R. Mathew, M. S., și G. K., „Vocal Tract Parameter Estimation and Modeling with Application in Diagnosis of Voice Disorders”, *SSRN Electronic Journal*, 2021, doi: 10.2139/ssrn.3769897.
- [4] S. Bennett, S. Bishop, și S. M. Lumpkin, „Phonatory characteristics associated with bilateral diffuse polypoid degeneration.”, *Laryngoscope*, vol. 97, nr. 4, pp. 446–50, apr. 1987, doi: 10.1288/00005537-198704000-00007.
- [5] M. Ji, B. Liu, J. Jiang, M. R. Hoffman, J. Lan, și J. Fang, „Effect of Controlled Muscle Activation in a Unilateral Vocal Fold Polyp Setting on Vocal Fold Vibration”, *Applied Sciences*, vol. 12, nr. 23, p. 12486, dec. 2022, doi: 10.3390/app122312486.
- [6] J. Flanagan și L. Landgraf, „Self-oscillating source for vocal-tract synthesizers”, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, vol. 16, nr. 1, pp. 57–64, 1968, doi: 10.1109/TAU.1968.1161949.
- [7] E. Cataldo, J. C. Lucero, R. Sampaio, și L. Nicolato, „Comparison of some mechanical models of larynx in the synthesis of voiced sounds”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 28, nr. 4, pp. 461–466, dec. 2006, doi: 10.1590/S1678-58782006000400011.
- [8] J. Lucero, „Dynamics of the Vocal Fold Oscillation”, *TEMA. Tendências em Matemática Aplicada e Computacional*, vol. 6, iun. 2005, doi: 10.5540/tema.2005.06.01.0011.
- [9] L. Cveticanin, „Review on Mathematical and Mechanical Models of the Vocal Cord”, *J Appl Math*, vol. 2012, nr. 1, ian. 2012, doi: 10.1155/2012/928591.
- [10] H. T. Lathadevi și S. P. Guggarigoudar, „Objective Acoustic Analysis and Comparison of Normal and Abnormal Voices”, *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, vol. 12, pp. MC01–MC04, dec. 2018, doi: 10.7860/JCDR/2018/36782.12310.
- [11] P. W. Newman, R. W. Harris, și L. M. Hilton, „Vocal jitter and shimmer in stuttering”, *J Fluency Disord*, vol. 14, nr. 2, pp. 87–95, 1989, doi: [https://doi.org/10.1016/0094-730X\(89\)90002-8](https://doi.org/10.1016/0094-730X(89)90002-8).
- [12] Hwa-Young Pyo și Hyun-Sub Sim, „Shimmer Change According to Fundamental Frequency Variation of Korean Normal Adults”, *Phonetic Science*, vol. 10, nr. 1, pp. 143–150, 2003.
- [13] J. C. Lucero, K. G. Lourenço, N. Hermant, A. Van Hirtum, și X. Pelorson, „VOCAL FOLDS VIBRATIONS DURING PHONATION: EFFECT OF ACOUSTICAL COUPLING”.
- [14] M. Little, L. Ox, P. Uk, Mcsharry, I. Moroz, și S. Roberts, „A Simple Nonlinear Model of Vocal Fold Dynamics for Synthesis and Analysis”, sep. 2005.
- [15] S. Waghmare, R. R. Deshmukh, și S. N. Kayte, „Analysis of Fundamental Frequency, Jitter and Shimmer in Stuttered and Non-Stuttered Speech of Marathi Language”, *SSRN Electronic Journal*, 2019, doi: 10.2139/ssrn.3421501.
- [16] G. Li, Q. Hou, C. Zhang, Z. Jiang, și S. Gong, „Acoustic parameters for the evaluation of voice quality in patients with voice disorders”, *Ann Palliat Med*, vol. 10, nr. 1, pp. 130–136, ian. 2021, doi: 10.21037/apm-20-2102.
- [17] J. P. Teixeira și A. Gonçalves, „Algorithm for Jitter and Shimmer Measurement in

- Pathologic Voices”, *Procedia Comput Sci*, vol. 100, pp. 271–279, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.155>.
- [18] H. F. Wertzner, S. Schreiber, și L. Amaro, „Analysis of fundamental frequency, jitter, shimmer and vocal intensity in children with phonological disorders”, *Braz J Otorhinolaryngol*, vol. 71, nr. 5, pp. 582–588, 2005, doi: [https://doi.org/10.1016/S1808-8694\(15\)31261-1](https://doi.org/10.1016/S1808-8694(15)31261-1).
- [19] M. Farrús și J. Hernando, „Using Jitter and Shimmer in speaker verification”, *Signal Processing, IET*, vol. 3, pp. 247–257, aug. 2009, doi: 10.1049/iet-spr.2008.0147.
- [20] P. Boersma și D. Weenink, „PRAAT, a system for doing phonetics by computer”, *Glott international*, vol. 5, pp. 341–345, ian. 2001.
- [21] M. Chirila și R. Mureșan, *Reabilitarea și igiena vocii*. 2010.
- [22] contributorii Wikipedia, „Vocală”, Wikipedia, enciclopedia liberă. Data accesării: 24 iunie 2024. [Online]. Disponibil la: [//ro.wikipedia.org/w/index.php?title=Vocal%C4%83&oldid=15904536](https://ro.wikipedia.org/w/index.php?title=Vocal%C4%83&oldid=15904536)
- [23] J. C. Catford, *A practical introduction to phonetics*, 2-lea ed. New York: Oxford University Press Inc., 2001.
- [24] G. Williamson, „Acoustic Measures (Norms)”, <https://www.sltinfo.com/acoustic-measures-norms/>.
- [25] I. Guimarães, *A ciência e a arte da voz humana*. 2007.