

ŠIAULIU UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS
ELEKTRONIKOS KATEDRA

Donatas Bauža

**KALBOS TRAKTO PERDAVIMO FUNKCIJOS
MODELIAVIMAS**

Magistro darbas

Vadovas

dr. doc. Gintautas Daunys

ŠIAULIAI, 2014

ŠIAULIU UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS
ELEKTRONIKOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

dr. doc. Gintautas Daunys

2014 06

**KALBOS TRAKTO PERDAVIMO FUNKCIJOS
MODELIAVIMAS**

Magistro darbas

Vadovas

(parašas) dr. doc. Gintautas Daunys

2014 06

Recenzentas

ŠU Technologijos ir gamtos mokslų
fakultetas

Elektronikos katedra

Atliko

(parašas)

2014 06

RM-12. gr. stud.

Donatas Bauža

(Parašas) dr. doc. Dainius Balbonas

2014 06

ŠIAULIAI, 2014

Bauža D. Kalbos trakto perdavimo funkcijos modeliavimas: Signalų technologijos programos magistro baigiamasis darbas / vadovas dr. doc. Gintautas Daunys; Šiaulių universitetas, Technologijos ir gamtos mokslų fakultetas, Elektronikos katedra. – Šiauliai, 2014. – 58p.

SANTRAUKA

Darbą sudaro 57 puslapiai. Darbe yra 8 paveikslukai, 8 grafikai ir 16 lentelių. Darbo tikslas buvo išsiaiškinti kaip keičiasi sintezuotų balsių formantų energija bei dažnis, keičiant oro tankio ir oro trinties į balso trakto sienelės koeficiento dydžius. Darbe buvo MatLab ir Praat programų pagalba ištirti: a trumpas, a ilgas, e trumpas ir e ilgas balsiai. Oro tankio dydžio keitimas buvo pasirinktas remiantis oro tankio kitimu natūraliomis sąlygomis esant -20°C (šaltą žiemą) ir 30°C (karšta vasara). O trinties koeficiento pokytis – 7%. Tyrimo metu gauti duomenys rodo nedidelį balsių formantų energijų ir dažnių pokytį (iki 1%). Kai kuriais atvejais išryškėja vieno formanto parametrų pokytis, kuris gali siekti iki 4%. Taigi galima sutikti, kad keičiant oro tankio dydį ir trinties koeficientą, galima nežymiai pakoreguoti sintezuojamų balsių formantų parametrus.

Bauža D. Modeling transfer function of vocal tract: Master's Work in study program Signal Technology / supervisor dr. assoc. prof. Gintautas Daunys; Department of Electronics, Faculty of Technology and Nature, Šiaulai University. – Šiaulai, 2014. – 58p.

SUMMARY

Work contains 57 pages. There is 8 pictures, 8 diagrams and 16 tables. The purpose of this work was to analyze how air density and friction value influences artificial vowel's formant energy and frequency. MatLab was used to generate artificial vowel and Praat was used to get and analyze formants. Air density change conditions was chosen similar to natural conditions in cold winter and hot summer. Friction changes because of vocal tract humidity. 7% change was taken. Test results showed 1% change in vowel formant energy and frequency. In some cases there was 4% change in vowel formant energy and frequency. We can use vocal tract parameters like air density and friction to slightly change artificial vowel's parameters.

Turinys

IVADAS	6
1. FORMANTAI	8
2. AKUSTINIO VAMZDŽIO MODELIS	11
2.1 Kalbos trakto schema ir vokalinio trakto akustika	11
2.2 Elementarus akustinis vamzdis	12
2.3 Elementaraus akustinio vamzdžio matematinis modelis.....	17
2.3.1 Tolydinė antros eilės grandis	18
2.3.2 Diskretinė antros eilės grandis.....	21
2.4 Elektroninis akustinio vamzdžio modelis	24
3. TYRIMO ĮGYVENDINIMAS.....	35
4. TYRIMO REZULTATAI	37
IŠVADOS	43
LITERATŪRA	44
PRIEDAI.....	45

IVADAS

Kalbos spektro tyrinėjimai yra susiję su šiuolaikiniais žmogaus ir kompiuterizuotų sistemų sąsajos veikimo principais, kurių vienas iš pagrindų - kalbos sintezė ir atpažinimas. Kalbos sintezė ir atpažinimas yra susijęs su daugelį sričių tokių kaip: akustika, signalų technologijos, kompiuterių mokslas, lingvistika, informacijos ir komunikacijos teorija, psichologija. Darbas siejamas su lietuvių kalbos sintezės problemomis ir galimybėmis panaudoti elektronines priemones šioms problemoms spręsti. Vienos iš aktualiausių kalbos sintezės panaudojimo sričių yra: priemonės neįgaliesiems, telekomunikacinės ir mokymo procesų priemonės, kompiuterizuotos aptarnavimo-administravimo priemonės [1].

Teksto pavidalu saugoma informacija panaudojant sintezę gali būti perskaitoma balsu. Tokiu atveju kalbos sintezė leistu neįgaliesiems (regėjimo sutrikimas, motoriniai sutrikimai) leistų naudotis kompiuterizuotomis darbo vietomis ir įvairiomis informacinėmis sistemomis. Mokymo procese kalbos sintezę būtų galima panaudoti kalbos mokymuisi, logopedijai. Taip pat kalbos sintezės teikiamais privalumais plačiausias vartotojų ratas pasinaudotu teikiant administravimo-aptarnavimo ir telekomunikacines paslaugas – būtų galima pagerinti klientų aptarnavimą, komunikacija virtualioje erdvėje paklėti į aukštesnį lygį [1]. Balso technologijos jau senokai priskiriamos strateginei naujų telekomunikacinių paslaugų kūrimo kryptčiai [2].

Šiuo metu pasaulyje yra atliekama daug įvairių tyrimų, kuriant naujas ar tobulinant jau sukurtas kalbos sintezės ir atpažinimo sistemas, kurių vienas iš aspektų - garsų spektro tyrimai. Formantų nustatymui panaudojant kalbos signalą yra skirta nemažai darbų, bet dar nėra sukurta algoritmo, kuris su dideliu patikimumo laipsniu nustatytų formantų dažnius. Problema slypi balso generavimo kaip proceso nestacionarume, bei balso įrašymo triukšmuose. Visi metodai, kurie naudojami formantų dažnio nustatymui nėra absoliučiai tikslius, bet tinkami formantų dažnių nustatymui.

Visiškai suprantama, kad plačiausiai šios srities tyrimai atliekami didžiosioms pasaulio kalboms, pvz. tyrinėjami skirtumai tarp anglišku garsų spektrų skirtingose, angliškai kalbančiose šalyse (JAV, Kanada, Australija). Nemažos dalies atliktų tyrimų tikslas - nustatyti balsingų garsų vidutinį F_1 , F_2 , F_3 , F_4 formantų dažnį ir nupiešti F_1 , F_2 formantų žemėlapi, bei palyginti jį su D. Joneso kardinaliniais balsiais. Lietuvoje panašių tyrimų atliekama nedaug. Lietuvos mokslininkų atliekami darbai susiję ne tik su bendrine kalba, bet ir su įvairiomis šnektomis, tokiu atveju nustatomi to paties garso centrinio dažnio skirtumai skirtingose

šnektose [8],[9]. Nemažai darbų šioje srityje yra atlikę Matematikos ir informatikos instituto mokslininkas doc. dr. A. L. Lipeika su studentais [4], [5], [6], [7]. Šių mokslininkų darbai, susiję su lietuvių kalbos ir garsų analize, sinteze bei atpažinimu, paskatino pradėti lietuvių kalbos formantų tyrimus.

Taip pat reiktų atkreipti dėmesį į tai, kad pasaulyje vyrauja statistiniai tyrimai. Tokių eksperimentų metu tyrimai atliekami su dideliu skaičiumi žmonių ir gaunami bendri rezultatai plačiai tiriamųjų grupei. Todėl tokie rezultatai ne visada gali atitikti atskiro individo tyrimo rezultatus [1]. Šiame darbe orientuojamasi ne tik į bendrus kalbos parametrus tinkančius visiems žmonėms, bet siekiama iširti kaip kalbos trakto parametrai įtakoja sintezuojamą kalbą.

Darbo tikslas

Pasinaudojant elektronines priemones eksperimentiškai iširti kaip kalbos trakto parametrai įtakoja sintezuojamą kalbą (sintezuojamus balsius).

Tyrimo metodai

Sumodeliuojamas elementarus elektroninis kalbos trakto modelis panaudotas MatLab programos paketą. Darbe praktinei akustinio vamzdžio modelio realizacijai pasirinktas elementarus akustinio vamzdžio modelis. Susintezuoto garso formantai randami ir ištiriami praat programos pagalba.

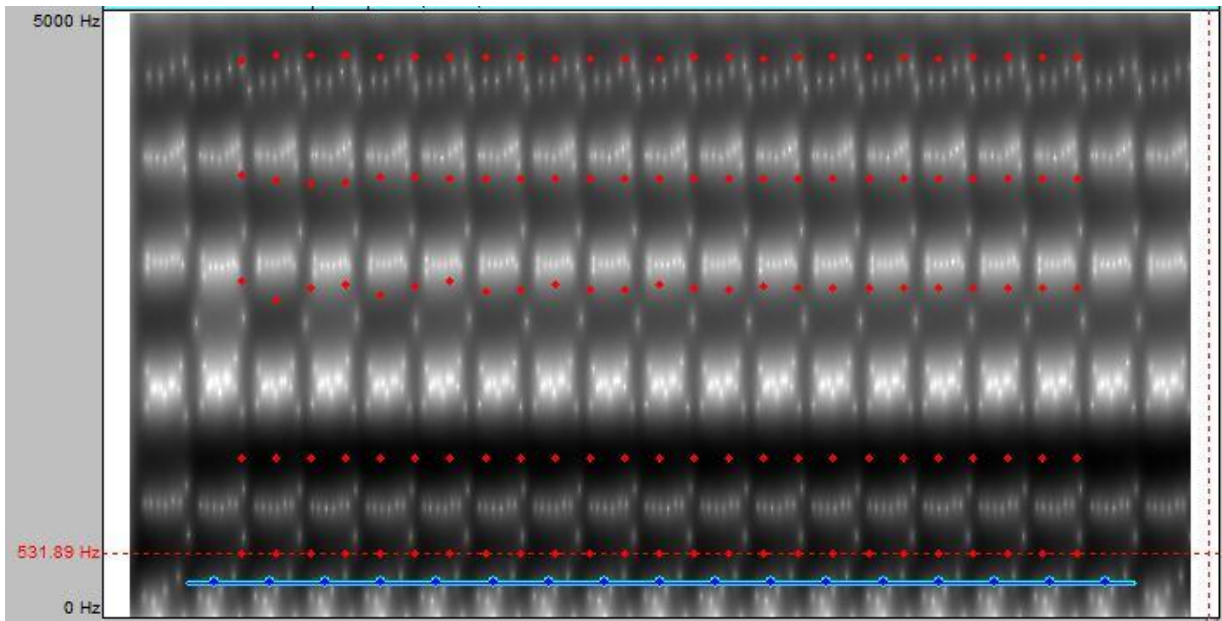
1. FORMANTAI

Formantai yra vienas iš kalbos signalų komponentų naudojamų kalbos atpažinimui, charakterizavimui ir sintezei. Kalbos sintezė susijusi su daugeliu disciplinų, tokių kaip: signalų technologijos, akustika, intonacijos atpažinimas, komunikacija ir informacijos teorija, lingvistika, psichologija, kompiuterių mokslas, fiziologija [10]. Formantai - tai kalbos trakto rezonansiniai dažniai. Formantą dar galima apibrėžti kaip energijos susikcentravimo sritis garso spektrogramoje. Garso formantai parodo intensyviausius taškus dažnių juostoje. Pasinaudojus balsių vamzdžio modeliu galima nustatyti tipinį balsių formantų dažnį [1]. Kuo didesnis vamzdžių-segmentų skaičius, tuo tiksliau aproksimuojamos konkretaus balsio akustinės charakteristikos [3]. Standartiškai formantų dažniai yra išsidėstę maždaug kas 1000 Hz, pradedant nuo 300 Hz. $F_1 = 300-700$ Hz, $F_2 = 900-1700$ Hz, $F_3 = 2000-2700$ Hz ir t.t. Formantai kinta balso traktui keičiant formą, t.y. tariant skirtingas fonemas. Žmogaus kalboje galima užfiksuoti 9 ir daugiau formantų. Formantai numeruojami nuo žemesnio dažnio. Kalbos analizei gali būti naudojami pirmi penki formantai $F_1 \div F_5$. Aukštesnių dažnių (5000-8000 Hz) formantai yra mažos amplitudės ir yra praktiškai negirdimi.

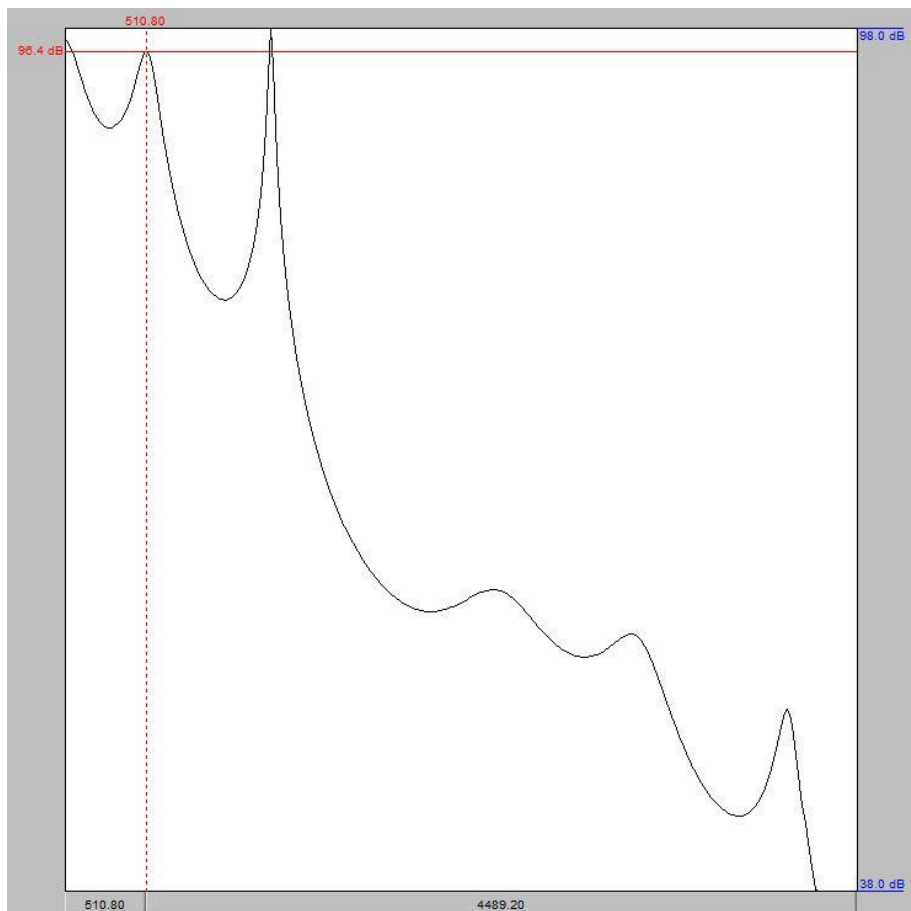
Nevokalizuoti garsai neturi formantų; sprogstamuosius priebalsius identifikuoja smarkus energijos išsiveržimas per visus dažnius įvykstantis po santykinės tylos, o aspiratos (pusbalsiai) ir frikatyviniai priebalsiai yra labiau laikomi reliatyviai ramios energijos srautais skersai abiejų laiko ir dažnio ašių.

Balsiai turi stiprias pastovias formantas, todėl jie gali būti lengvai atpažįstami iš pirmų dviejų arba trijų formantų, kurie yra vadinami F_1 , F_2 , ir F_3 , dažnių reikšmių. Balseje F_1 gali kisti nuo 300 iki 1000 Hz, F_2 gali kisti nuo 850 iki 2500 Hz. Apvali lūpų padėtis parodo esant žemesnę F_2 reikšmę nei kitokia lūpų padėtis. F_3 nustato duoto kalbos garso foneminę kokybę. Manoma, kad aukštesni formantai, tokie kaip F_4 ir F_5 , yra svarbūs norint nustatyti balso kokybę [1].

Formantai yra gerai matomi garso spektrogramose (1 pav.)



1 pav. Trumpo a balsio spektrograma.



2 pav. trumpo a balsio spektrogramos skersinis pjūvis

Spektrinėse diagramose matomos smailės, atitinka formantus. Spektrinės diagramos apibūdina garsą tik labai trumpame laiko tarpe. Kalbančio žmogaus skleidžiamas garsas kinta laike, todėl kalbai pavaizduoti naudojamos dažnių ir laiko diagramos – spektrogramos. Spektrogramos gerai atspindi dinaminį kalbos spektro pokytį. Jose gerai matomi perėjimai tarp balsių ar perėjimai dvibalsiuose, taip pat gerai matomi staigūs spektro pokyčiai priebalsiuose.

Spektrogramos abscisė yra laikas, ordinatė – dažnių intervalas. Spektrogramoje vaizduojamas kiekvieno dažnio bangų intensyvumas (amplitudė) tam tikru laiko tarpu. Šis intensyvumas vaizduojamas spalvos ryškumu. Kuo tam tikro dažnio bangos amplitudė yra didesnė, tuo tamsesnė intensyvumą nurodanti spalva.

Formantus galima gauti šiais būdais:

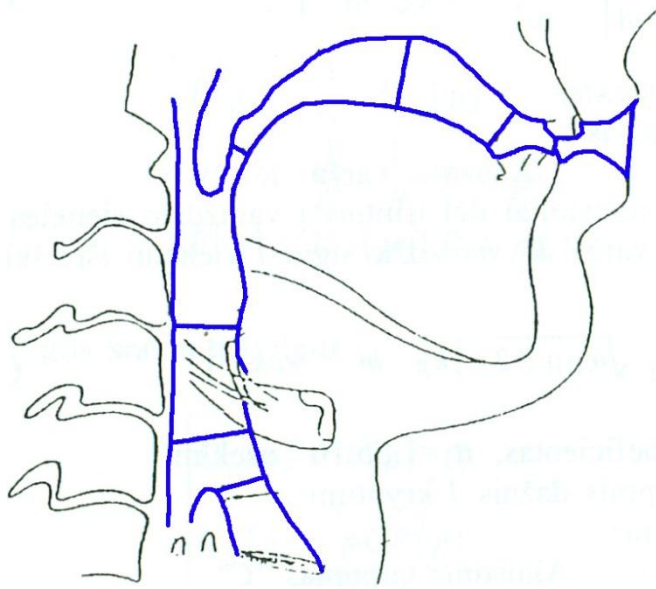
- Furje analizė (DFT – discrete Fourier transform),
- tiesinės prognozės analizė (LPC – Linear predictive coding),
- kepstrinė analizė (MFCC – Mel frequency cepstral coefficients),
- Balso trakto ploto metodas, panaudojant dalelių filtrą.

Dėl savo populiarumo ir paprastumo buvo pasirinkta Tiesinės prognozės analizės būdas formantams gauti. Tiesinės prognozės analizės matematinis aparatas yra nesudėtingas, nereikalaujantis daug skaičiavimų, todėl greitai gaunami rezultatai. TP metodas labai gerai tinka vokalizuočių garsų analizei, labai tiksliai atvaizduoja kalbos spektro amplitudę [1].

2. AKUSTINIO VAMZDŽIO MODELIS

2.1 Kalbos trakto schema ir vokalinio trakto akustika

Žmogaus kalbos traktas nuo balso stygų iki nosies ir burnos ertmės pabaigos gali būti aprašytas matematiškai, panaudojant sukurtus modelius. Vienas iš tokių modelių yra akustinio vamzdžio modelis. Supaprastintas vizualinis kalbos traktas ir jo akustinis modelis parodytas 3 paveiksle.



3 pav. Supaprastinta kalbos trakto schema

Kalbos traktą sudaro aštuoni akustiniai vamzdžiai. Kalbos trakto skerspjūvis nuolat kinta. Tam tikrame laiko intervale atskirus trakto regionus galime laikyti pastovaus skerspjūvio akustiniu vamzdžiu, kurį dažnai vadiname elementariu akustiniu vamzdžiu.

Kai vamzdžiu teka oro srautas, tai susidaro inercijos jėgos, proporcingos oro masei ir srauto pagreičiui. Energijos nuostoliai dėl trinties į vamzdžio sienelės yra proporcingi srauto greičio kvadratui, o nuostoliai dėl šilumos laidumo per sienelės yra proporcingi greičio slėgio kvadratui.

Daugiau nagrinėjama yra vokalizuota kalba, nes kalbos natūralus skambėjimas yra susijęs su teisingu vokalizuotų garsų modeliavimu. Teisingas vokalizuotų garsų modeliavimas

yra susijęs su teisingu oro slėgio arba srauto nustatymu balsaskylėje. Oro srautą/slėgį galime įvertinti žinant balsaskylės plotą, bet oro srautas ne visuomet proporcingas plotui, nes akustinis pasipriešinimas kinta vokalizuo to garso metu. Mažiems balsaskylės plotams yra nustatyta, kad srautas pakeltas trečiuoju laipsniu proporcingas plotui [1].

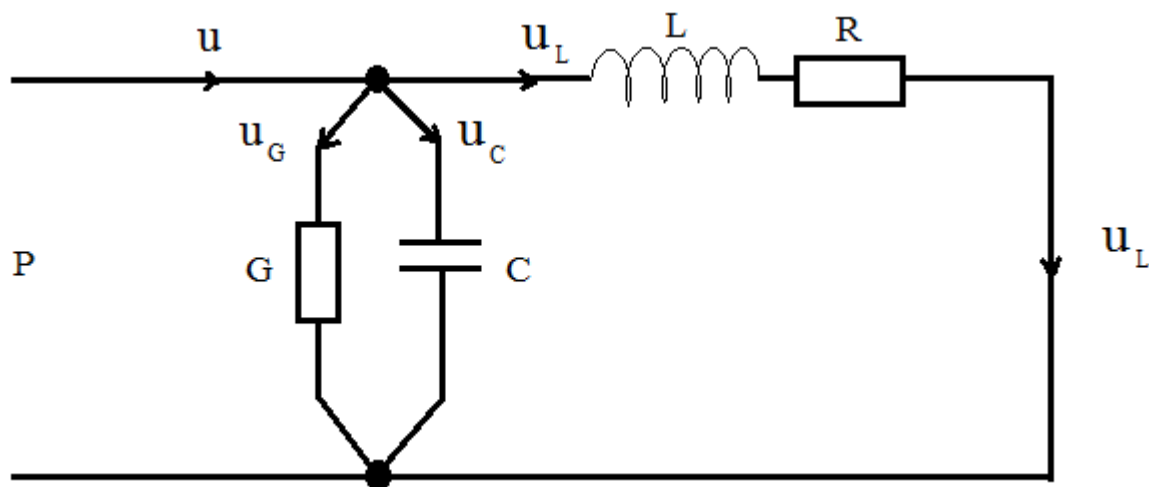
Kalbos trakto ilgis gali siekti iki 17cm, bet gali varijuoti priklausomai nuo žmogaus. Kalbos trakto ilgis kalbos metu gali kisti – pavyzdžiui, gali pailgėti lūpas atkišus į priekį ar nusileidus gerkloms. Taip pat reiktų pastebėti, kad garsą kalbos trakte veikia trakto sienelių vibracija, o dėl oro klampumo - trintis ir šiluminiai nuostoliai. Kalbos traktas yra kintamo pločio per visą savo ilgį, be to trakto plotas tam tikrose vietose gali kisti priklausomai nuo tariamų garsų. Visi šie parametrai turėtų būti įvertinti projektuojant akustinį vamzdį [1].

Garso bangas sukuria balso stygų vibracija. Garso bangų atsiradimas ir sklidimas paklūsta fizikos ir termodinamikos dėsniams. Projektuojant akustinį vamzdį, dėmesys yra skiriamas garso diapazonui, kurio dažnis yra žemiau 4kHz. Tokio dažnio bangos ilgis, kai oro greitis yra 340 m/s, yra 8,5 cm. Dažniui mažėjant, bangos ilgis didėja.

2.2 Elementarus akustinis vamzdis

Elementaraus akustinio vamzdžio ekvivalentinė schema yra 4 pav.

Tokia ekvivalentinė schema gerai atspindi vamzdžio akustines savybes dažnių diapazone, kol bangos ilgis yra daugiau 8 l. (l – vamzdžio ilgis).



4 pav. Akustinio vamzdžio ekvivalentinė schema

L - akustinis induktyvumas, **R** – akustinė varža, **C** – akustinis talpumas
G – akustinis laidumas

Akustinis induktyvumas „*L*“

Akustinė inercija vamzdžio ilgio vienetui:

$$L_a = \frac{q}{A} \quad (1.1)$$

$q=1.29\text{kg/m}^3$ – oro tankis,

A – vamzdžio skerspjūvis.

Akustinė varža „*R*“

Akustinė varža – tai nuostoliai dėl trinties į vamzdžio sienelės, proporcingi u^2 .

Ekvivalentinė paviršiaus varža R_a vamzdžio ilgio l vienetui išreiškiama taip:

$$R_a = \frac{s}{A^2} \sqrt{\omega \rho \mu / 2} \quad (1.2)$$

μ - vidinės trinties koeficientas, $\mu = 1,86 \cdot 10^{-5} \text{nsek/m}^2$;

ω – oro greičio kampinis dažnis l kryptimi;

s – vamzdžio perimetras.

Akustinis talpumas „*C*“

Ekvivalentinis akustinis talpumas, arba elastingumas, priklauso nuo to, kiek galima suspausti oro turį, kuris yra l ilgio vamzdyje (oro stangrumas).

Akustinis talpumas vamzdžio ilgio vienetui C_a :

$$C_a = \frac{A}{\rho c^2} \quad (1.3)$$

kur

c – garso sklaidimo greitis;

$$c = 3.5 \cdot 10^{-2} \text{ m/s.}$$

Akustinis laidumas „ G “

Ekvivalentinis lygiagretus laidumas sudaro energijos nuostolius, kurie yra proporcingi lokalinio garso slėgio kvadratui. Šie nuostoliai priklauso nuo vamzdžio sienelių šilumos laidumo.

Akustinis laidumas vamzdžio ilgio vienetui G_a :

$$G_a = s \frac{\eta - 1}{pc^2} \sqrt{\frac{\lambda \omega}{2c_p \rho}} \quad (1.4)$$

η – adiabatinė pastovioji: specifinės šilumos prie pastovaus slėgio santykis su specifine šiluma prie pastovaus tūrio,

η – 1,4 orui normalinėse sąlygose;

λ – šilumos laidumo koeficientas,

$$\lambda = 23,03 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^{\circ}\text{C};$$

c_p – specifinis oro šilumos talpumas prie pastovaus slėgio,

$$c_p = 1005 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C (1 atm).}$$

Rašome lygtis ekvivalentinei akustinio vamzdžio schemai, kurioje kintamuosius išreiškiame Laplaso vaizdais

$$\begin{cases} P(p) = \frac{1}{G} \cdot U_G(p) \\ P(p) = \frac{1}{c} \cdot \frac{1}{P} \cdot U_C(p) \\ P(p) = U_L(p)(R + pL) \end{cases}$$

Išsprendžiame lygtis srautų atžvilgiu:

$$\begin{cases} U_G(p) = P(p) \cdot G \\ U_C(p) = pCP(p) \\ U_L(p) = \frac{1}{R+pL} P(p) \end{cases}$$

Sumuodami srautus, gauname:

$$U(p) = U_G(p) + U_C(p) + U_L(p) = P(p) \left(G + pC \frac{1}{R + pL} \right)$$

Iš čia turime akustinio vamzdžio impedanco išraišką:

$$Z(p) = \frac{P(p)}{U(p)} = \frac{R + pL}{(G + Cp)(R + pL) + 1} = \frac{R + Lp}{LC(p^2 + \frac{RC + LG}{LC}p + \frac{1 + RG}{LC})}$$

Įvedame laiko konstantos parametą, pažymėdami:

$$LC = T^2$$

$$RC = T_C$$

$$LG = T_G$$

$$\frac{L}{R} = T_L$$

Tada akustinio vamzdžio impedanso išraiška įgyja šią formą:

$$Z(p) = R \cdot \frac{(1+T_L p) \cdot \frac{1}{T^2}}{p^2 + \frac{T_C + T_G}{T^2} p + \frac{1+RG}{T^2}} \quad (1.5)$$

Išsprendžiame charakteringą lygtį:

$$p^2 + \frac{T_c + T_G}{T^2} p + \frac{1 + RG}{T^2} = 0$$

Gauname charakteringosios lygties šaknų išraišką:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2} \frac{T_c + T_G}{T^2} \pm \frac{1}{T} \sqrt{\frac{1}{4} \frac{(T_c + T_G)^2}{T^2} - (1 + RG)} \quad (1.6)$$

Jeigu pošaknis yra neigiamas, t.y

$$\frac{1}{4} \frac{(T_c + T_G)^2}{T^2} < 1 + RG$$

tai šaknys yra kompleksinės – jungtinės:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2} \frac{T_c + T_G}{T^2} \cdot \frac{1}{T} \pm j \frac{1}{T} \sqrt{(1 + RG) - \frac{1}{4} \frac{(T_c + T_G)^2}{T^2}}$$

Įvedame standartinius parametrus:

$$\omega_0 = \frac{1}{T} = 2\pi \cdot \frac{1}{T} = 2\pi f_0$$

kur

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.7)$$

yra dinaminės grandies rezonancinis dažnis, o

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{T_C + T_G}{T} \quad (1.8)$$

yra dinaminės grandies (akustinio vamzdžio) santykinis slopinimas.

Tuo būdu, elementaraus akustinio vamzdžio charakteringos lygties šaknų išraiška įgijo įprastąją švytuojančios grandies formą:

$$p_{1,2} = -\xi \omega_0 \pm j \omega_0 \sqrt{(1 + RG) - \xi^2} \quad (1.9)$$

Tuo atveju, kada laidumą galima paneigti, t.y. $G = 0$, turime:

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{T_C}{T}$$

$$p_{1,2} = -\xi \omega_0 \pm j \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} \quad (1.10)$$

Tai yra idealus akustinis vamzdis be nuostolių.

2.3 Elementaraus akustinio vamzdžio matematinis modelis

Elementarus akustinis vamzdis yra antros eilės dinaminė grandis. Todėl jos dinamiką aprašo antros eilės diferencialinė lygtis arba aproksimuoja antros eilės skirtuminė lygtis.

2.3.1 Tolydinė antros eilės grandis

Antros eilės grandį aprašo diferencialinė lygtis:

$$a_0 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_2 y = b_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + b_1 \frac{dx}{dt} + b_2 x \quad (1.11)$$

y – išėjimo kintamasis,

x – įėjimo kintamasis,

a_0, a_1, a_2 – kairės pusės lygties koeficientai,

b_0, b_1, b_2 – dešinės pusės lygties koeficientai.

Daliname (1.11) lygtį iš koeficiento a_0 ir gauname:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{a_1}{a_0} \frac{dy}{dt} + \frac{a_2}{a_0} y = \frac{1}{a_0} \left(b_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + b_1 \frac{dx}{dt} + b_2 x \right) \quad (1.12)$$

Įvedame naujus parametrus, kurie tenkina šias lygybes:

$$\begin{cases} \frac{a_1}{a_0} = 2\xi\omega_0, \\ \frac{a_2}{a_0} = \omega_0^2, \end{cases} \quad (1.13)$$

kur įvestas naujas parametras ξ reiškia santykinį slopinimo laipsnį, o parametras ω_0 – nuosavą dažnį.

Parametrai nustatomi iš (1.13) taip:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{a_2}{a_0}} \quad (1.14)$$

$$\xi = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}} \quad (1.15)$$

Lygties (1.12) dešinės pusės daugiklį $1/a_0$ pavadiname stiprinimo koeficientu ir nustatome taip:

$$h = \frac{1}{a_0} = \frac{\omega_0^2}{a_2} \quad (1.16)$$

Tuo būdu, tolydinės grandies diferencialinė lygtis (1.12) su naujaisiais parametrais įgyja šį pavidalą:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\xi\omega_0 \frac{dy}{dt} + \omega_0 y = h \left(b_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + b_1 \frac{dx}{dt} + b_2 x \right) \quad (1.17)$$

Pritaikome Laplaso transformaciją šiai išraiškai ir gauname operatorinę lygtį:

$$(p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2 p)Y(p) = h(b_0 p^2 + b_1 p + b_2)X(p) \quad (1.18)$$

Tolydinės antros eilės grandies perdavimo funkcija gaunama iš (1.18) tokiame pavidale:

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = h \frac{b_0 p^2 + b_1 p + b_2}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2 p} \quad (1.19)$$

Toliau randame perdavimo funkcijos polių ir nulius.

Iš charakteringosios lygties

$$p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2 p = 0$$

Nustatome polių:

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= -\xi\omega_0 + \omega_0\sqrt{\xi^2 - 1} , \\ p_2 &= -\xi\omega_0 - \omega_0\sqrt{\xi^2 - 1} . \end{aligned} \right\} \quad (1.20)$$

O perdavimo funkcijos (1.19) nuliai gaunami, skaitiklį prilyginus nuliui:

$$b_0 \left(p^2 + \frac{b_1}{b_0} p + \frac{b_2}{b_0} \right) = 0$$

arba

$$p^2 + \frac{b_1}{b_0} p + \frac{b_2}{b_0} = 0$$

tada

$$p^0 = -\frac{b_1}{2b_0} \pm \sqrt{\frac{b_1^2}{4b_0^2} - \frac{b_2}{b_0}} ,$$

$$\left. \begin{aligned} p_1^0 &= -\frac{b_1}{2b_0} + \frac{1}{2b_0} \sqrt{b_1^2 - 4b_2b_0} , \\ p_2^0 &= -\frac{b_1}{2b_0} - \frac{1}{2b_0} \sqrt{b_1^2 - 4b_2b_0} . \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

Tokiu būdu, antros eilės tolydinės grandies perdavimo funkcija gali būti atvaizduota šioje formoje:

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = G(p) = \frac{b_0(p-p_1^0)(p-p_2^0)}{(p-p_1)(p-p_2)} \quad (1.22)$$

Diferencialinės lygties koeficientus išreiškiame, panaudodami polisu ir nulius.

Susumavę charakteringosios lygties šaknis gauname:

$$p_1 + p_2 = -2\xi\omega_0 \quad (1.23)$$

Sudauginę charakteringosios lygties šaknis

$$p_1 p_2 = \omega_0^2 \quad (1.24)$$

Gavome diferencialinės lygties kairės pusės koeficientus.

Atlikę tuos pačius veiksmus su nuliais, gauname dešinės pusės diferencialinės lygties koeficientus:

$$p_1^0 + p_2^0 = -\frac{b_1}{b_0} \quad (1.25)$$

ir

$$p_1^0 p_2^0 = \frac{b_2}{b_0} \quad (1.26)$$

Jei koeficientai $b_2=b_1=0$, tada perdavimo funkciją apsprendžia tik charakteringosios lygties šaknis ir stiprinimo koeficientas.

2.3.2 Diskretinė antros eilės grandis

Taikome z – transformaciją:

$$z = e^{pT},$$

kur

p – Laplaso operatorius,

T – tolydinio signalo diskretizavimo intervalas:

$$T = \frac{1}{f_s},$$

f_s – diskretizavimo dažnis

Taikant z transformaciją, charakteringosios lygties šaknys p_1 ir p_2 iš kompleksinės p – plokštumos pereina į kompleksinę z – plokštumą:

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= e^{p_1 T} = e^{-\xi \omega_0 T + \omega_0 T \sqrt{\xi^2 - 1}} \\ z_2 &= e^{p_2 T} = e^{-\xi \omega_0 T - \omega_0 T \sqrt{\xi^2 - 1}} \end{aligned} \right\} \quad (1.27)$$

Tokiu būdu diskretinės antros eilės grandies šaknis gauname kompleksinėje z – plokštumoje.

Diskretinės lygties nuliai skaičiuojami analogiškai:

$$\left. \begin{aligned} z_1^0 &= e^{p_1^0 T} \\ z_2^0 &= e^{p_2^0 T} \end{aligned} \right\} \quad (1.28)$$

Tokiu būdu antros eilės diskretinė perdavimo funkcija išreiškiama:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = G(z) = h \frac{b_0(z-z_1^0)(z-z_2^0)}{(z-z_1)(z-z_2)}. \quad (1.29)$$

Perdavimo funkcijos vardiklį nustatome taip:

$$(z - z_1)(z - z_2) = z^2 - (z_1 + z_2)z + z_1 z_2 = z^2(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}),$$

kur

$$\begin{aligned}
a_0 &= 1, \\
a_1 &= -(z_1 + z_2), \\
a_2 &= z_1 z_2.
\end{aligned}
\tag{1.30}$$

Koeficientai a_1 ir a_2 išreiškiami per charakteringojo polinomo šaknis.

Analogiškai suskaičiuojamas perdavimo funkcijos skaitiklis, jo koeficientai gaunami iš nulių:

$$b_0(z - z_1^0)(z - z_2^0) = b_0[z^2 - (z_1^0 + z_2^0)z + z_1^0 z_2^0] = z^2(b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}),$$

$$\begin{aligned}
b_1 &= -(z_1^0 + z_2^0)b_0, \\
b_2 &= z_1^0 z_2^0 b_0.
\end{aligned}
\tag{1.31}$$

Turėdami skaitiklio ir vardiklio perdavimo funkcijos polinomo koeficientus, gauname tokią atnors eilės dinaminės grandies diskretinės perdavimo funkcijos išraišką:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = G(z) = h \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \tag{1.32}$$

Iš aukščiau esančios formulės gauname operatorinę grandies lygtį:

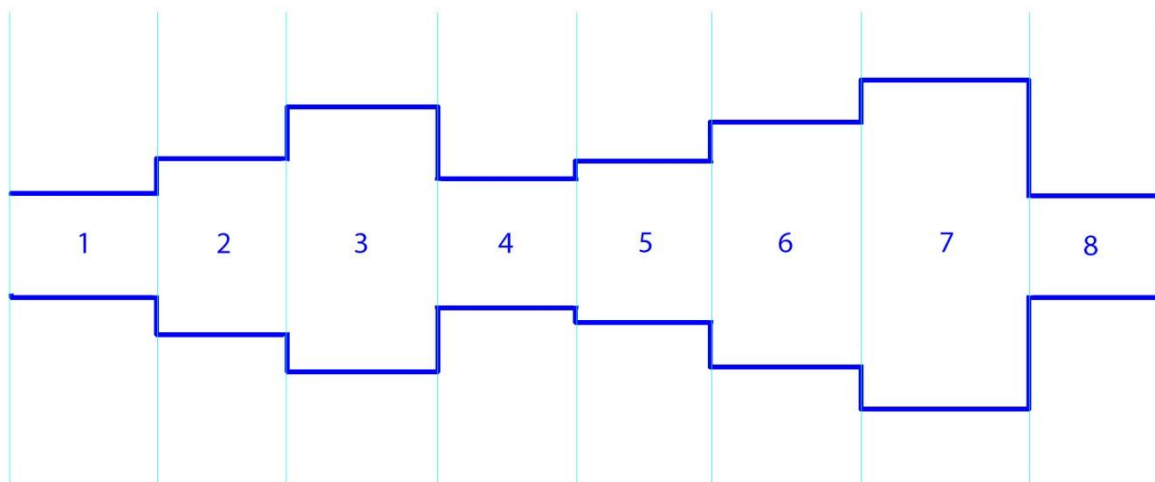
$$Y(z) \sum_{i=0}^2 a_i z^{-i} = h X(z) \sum_{i=0}^2 b_i z^{-i} \tag{1.33}$$

Pritaikę atvirkščią z – transformaciją, gauname grandies skirtuminę lygtį:

$$\sum_{i=0}^2 a_i y[(n - i)T] = h \sum_{i=0}^2 b_i x[(n - i)T] \tag{1.34}$$

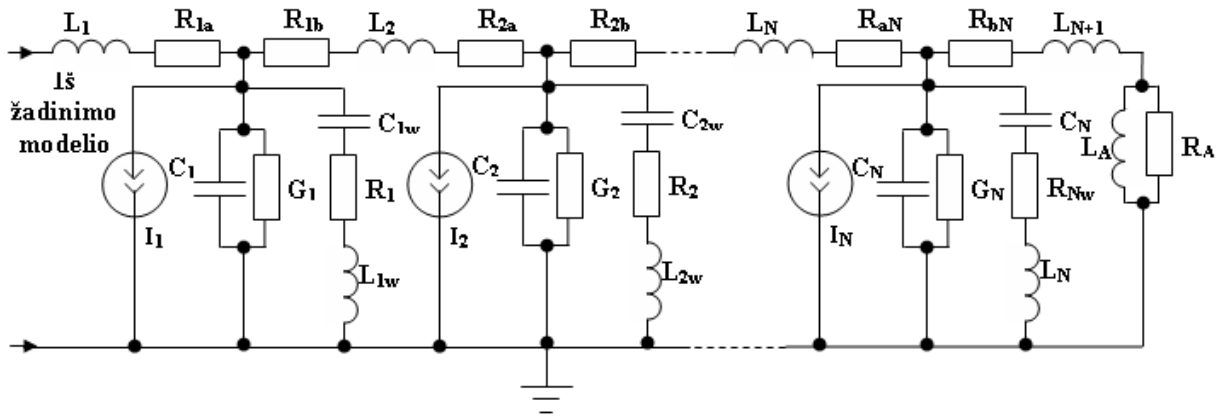
2.4 Elektroninis akustinio vamzdžio modelis

Kaip anksčiau minėta akustinio vamzdžio skerspjūvio plotas įvairiose vietose nuolat kinta. Tokiu atveju sumodeliuoti akustinio vamzdžio modelį labai sudėtinga. Siekiant supaprastinti akustinį vamzdį, jis suskirstomas į segmentus 123pav.



5 pav. Diskretizuotas akustinis vamzdis.

Tokiu atveju mes turime tarsi diskretizuotą akustinį vamzdį. Tokiu atveju akustinį vamzdį aprašančius parametrus išreikšti diskretiniais elektrinės grandinės elementais. Ryšį tarp oro tūrio greičio (elektrinės srovės analogas I) ir oro slėgio (įtampos analogas U) galima paaikškinti per impedansą Z , pasitelkiant tokias sąvokas kaip varža, talpumas ir induktyvumas. Kadangi oro masė yra inertiška ir kartu yra spūdi, tai inertiškumą galima prilyginti induktyvumui L , spūdumą prilyginti talpai C [1]. Atvaizduojant diskretiniais elementais, reikia priimti, kad skerspjūvis tam tikroje vamzdžio atkarpoje nekinta. Pilno signalo elektroninio akustinio vamzdžio modeliui sudaryti naudojame T tipo grandines. Keičiant T segmentų parametrus galima keisti akustinio vamzdžio segmento skerspjūvio plotus ir taip imituoti perėjimą iš vieno balsio akustinio modelio į kito balsio akustinį modelį. Skerspjūvio plotai iš modelio gaunami pasinaudojant L , C ir apkrovos varžos sąryšiais su skerspjūvio plotu. Sąryšiai patiekiami žemiau.



6 pav. Pilno signalo akustinio vamzdžio elektroninė grandinė.

Matematinį akustinio vamzdžio modelis sudarytas panaudojus būsenos kintamųjų metodą, kur būsenos kintamieji yra įtampa talpoje (atitinka garso slėgį) ir srovė induktyvume (atitinka oro tūrio greitį). Kiekvienam segmentui sudaroma pirmos eilės diferencialinė lygtis. Lygčių koeficientai, esantys dešinėje lygties pusėje, yra priklausomi nuo laiko. Koeficientai kinta lėtai dėl lėto žadinimo proceso.

Taigi pasinaudojus Kirkofo dėsniu galime aukščiau esančia elektrine grandine aprašyti lygtimis. Pirmiausia sudarome srovių lygtis mazgams:

$$\begin{aligned}
 i_{L_1} &= i_{C_1} + i_{G_1} + i_{L_{1w}} + i_{L_2} + i_1, \\
 i_{L_{1w}} &= i_{C_{1w}} \\
 i_{L_2} &= i_{C_2} + i_{G_2} + i_{L_{2w}} + i_{L_3} + i_2, \\
 i_{L_{2w}} &= i_{C_{2w}} \\
 &\dots\dots\dots \\
 i_{L_N} &= i_{C_N} + i_{G_N} + i_{C_{Nw}} + i_{L_{N+1}} + i_N, \\
 i_{L_{Nw}} &= i_{C_{Nw}} \\
 i_{L_N} &= \frac{U_A}{R_A + R_{bN}},
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

čia, i_L - srovė per induktyvumą, i_C - srovė per talpumą, i_G – srovė per laidumą, skaičiai prie L , C ir G nurodo segmento numerį, N – paskutinis segmentas, U_A - įtampa ant apkrovos,

R_A – apkrovos varža, R_{bN} – varža. Srovės tekančios per varžas lygios srovėms tekančioms per nuosekliai toms varžoms prijungtus induktyvumus.

Sudarome įtampų lygtis kontūrams:

$$\begin{aligned}
 E &= u_{R_g} + u_{L_1} + u_{R_{1a}} + u_{C_1}, \\
 u_{C_1} &= u_{R_{1b}} + u_{L_2} + u_{R_{2a}} + u_{C_2}, \\
 u_{C_1} &= u_{C_{1w}} + u_{L_{1w}} + u_{R_{1w}}, \\
 u_{C_2} &= u_{R_{2b}} + u_{L_3} + u_{R_{3a}} + u_{C_3}, \\
 u_{C_2} &= u_{C_{2w}} + u_{L_{2w}} + u_{R_{2w}} \\
 &\dots\dots\dots \\
 u_{C_N} &= u_{R_{bN}} + u_{L_N} + U_A, \\
 u_{C_N} &= u_{C_{Nw}} + u_{L_{Nw}} + u_{R_{Nw}}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

čia, u_L - įtampa ant induktyvumo, u_C - įtampa ant talpumo, u_R – tampa ant varžos, skaičiai prie L , C , ir R nurodo segmento numerį, g – žadinimo grandinės elementai, N – paskutinis segmentas, U_A – įtampa ant apkrovos, E – žadinimo įtampa.

Jei induktyvumo įtampą išreikštume kaip induktyvumo srovės išvestinę padaugintą iš induktyvumo, o talpumo srovę - kaip talpumo įtampos išvestinę padauginta iš talpos, turėtume šias dvi lygtis:

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}, \quad i_C = C \frac{du_C}{dt}. \tag{2.3}$$

Pasinaudoję (2.3) lygtimis ir pertvarkę (2.1),(2.2) lygtis gausime (2.4) ir (2.5):

$$\begin{aligned}
L_1 \frac{di_{L_1}}{dt} &= E - u_{R_g} - u_{R_{1a}} - u_{C_1}, \\
L_2 \frac{di_{L_2}}{dt} &= u_{C_1} - u_{R_{1b}} - u_{R_{2a}} - u_{C_2}, \\
L_{1w} \frac{di_{L_{1w}}}{dt} &= u_{C_1} - u_{C_{1w}} - u_{R_{1w}}, \\
L_3 \frac{di_{L_3}}{dt} &= u_{C_2} - u_{R_{2b}} - u_{R_{3a}} - u_{C_3}, \\
L_{2w} \frac{di_{L_{2w}}}{dt} &= u_{C_2} - u_{C_{2w}} - u_{R_{2w}}, \\
&\dots\dots\dots \\
L_N \frac{di_{L_N}}{dt} &= u_{C_N} - u_{R_{bN}} - U_A, \\
L_{Nw} \frac{di_{L_{Nw}}}{dt} &= u_{C_N} - u_{C_{Nw}} - u_{R_{Nw}},
\end{aligned} \tag{2.4}$$

$$\begin{aligned}
C_1 \frac{du_{C_1}}{dt} &= i_{L_1} - i_{G_1} - i_{L_2} - i_{L_{1w}} - i_1, \\
C_{1w} \frac{du_{C_{1w}}}{dt} &= i_{L_{1w}}, \\
C_2 \frac{du_{C_2}}{dt} &= i_{L_2} - i_{G_2} - i_{L_3} - i_{L_{2w}} - i_2, \\
C_{2w} \frac{du_{C_{2w}}}{dt} &= i_{L_{2w}}, \\
&\dots\dots\dots \\
C_N \frac{du_{C_N}}{dt} &= i_{L_N} - i_{G_N} - i_{L_{N+1}} - i_N, \\
C_{Nw} \frac{du_{C_{Nw}}}{dt} &= i_{L_{Nw}}, \\
\frac{U_A}{R + R_{bN}} &= i_{L_{N+1}},
\end{aligned} \tag{2.5}$$

(2.4) ir (2.5) lygtyse išvestines pakeitus baigtiniais pokyčiais, jas galima tiesiogiai integruoti. Tačiau toks integravimas duoda nestabilius sprendinius. Todėl pasirinksiame netiesioginį integravimą. Tuo atveju išvestines keičiame baigtiniais pokyčiais ir vidurkiname būsenos kintamųjų vertes tarp gretimų laiko momentų (lygtys (2.6)**Klaida! Nerastas uorodos šaltinis.** ir (2.7). Laiko momento vertės gaunamos, sprendžiant tiesinių lygčių sistemą.

$$\begin{aligned}
& \frac{L_1(k+1) \cdot i_{L_1}(k+1) - L_1(k) \cdot i_{L_1}(k)}{h} = E - \frac{u_{R_g}(k) + u_{R_g}(k+1)}{2} - \frac{u_{R_{1a}}(k) + u_{R_{1a}}(k+1)}{2} - \\
& \frac{u_{C_1}(k) + u_{C_1}(k+1)}{2}, \\
& \frac{L_2(k+1) \cdot i_{L_2}(k+1) - L_2(k) \cdot i_{L_2}(k)}{h} = \frac{u_{C_1}(k) + u_{C_1}(k+1)}{2} - \frac{u_{R_{1b}}(k) + u_{R_{1b}}(k+1)}{2} - \\
& \frac{u_{R_{2a}}(k) + u_{R_{2a}}(k+1)}{2} - \frac{u_{C_2}(k) + u_{C_2}(k+1)}{2}, \\
& \frac{L_{1w}(k+1) \cdot i_{L_{1w}}(k+1) - L_{1w}(k) \cdot i_{L_{1w}}(k)}{h} = \frac{u_{C_1}(k) + u_{C_1}(k+1)}{2} - \\
& \frac{u_{R_{1w}}(k) + u_{R_{1w}}(k+1)}{2} - \frac{u_{C_{1w}}(k) + u_{C_{1w}}(k+1)}{2}, \\
& \frac{L_3(k+1) \cdot i_{L_3}(k+1) - L_3(k) \cdot i_{L_3}(k)}{h} = \frac{u_{C_2}(k) + u_{C_2}(k+1)}{2} - \frac{u_{R_{2b}}(k) + u_{R_{2b}}(k+1)}{2} - \\
& \frac{u_{R_{3a}}(k) + u_{R_{3a}}(k+1)}{2} - \frac{u_{C_3}(k) + u_{C_3}(k+1)}{2}, \\
& \frac{L_{2w}(k+1) \cdot i_{L_{2w}}(k+1) - L_{2w}(k) \cdot i_{L_{2w}}(k)}{h} = \frac{u_{C_2}(k) + u_{C_2}(k+1)}{2} - \\
& \frac{u_{R_{2w}}(k) + u_{R_{2w}}(k+1)}{2} - \frac{u_{C_{2w}}(k) + u_{C_{2w}}(k+1)}{2}, \\
& \dots\dots\dots \\
& \frac{L_N(k+1) \cdot i_{L_N}(k+1) - L_N(k) \cdot i_{L_N}(k)}{h} = \frac{u_{C_N}(k) + u_{C_N}(k+1)}{2} - \\
& \frac{u_{R_{bN}}(k) + u_{R_{bN}}(k+1)}{2} - R_A \frac{i_{L_A}(k) + i_{L_A}(k+1)}{2}, \\
& \frac{L_{Nw}(k+1) \cdot i_{L_{Nw}}(k+1) - L_{Nw}(k) \cdot i_{L_{Nw}}(k)}{h} = \frac{u_{C_N}(k) + u_{C_N}(k+1)}{2} - \\
& \frac{u_{R_{Nw}}(k) + u_{R_{Nw}}(k+1)}{2} - \frac{u_{C_{Nw}}(k) + u_{C_{Nw}}(k+1)}{2},
\end{aligned} \tag{2.6}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{C_1(k+1) \cdot u_{C_1}(k+1) - C_1(k) \cdot u_{C_1}(k)}{h} = \frac{i_{L_1}(k) + i_{L_1}(k+1)}{2} - \frac{i_{G_1}(k) + i_{G_1}(k+1)}{2} - \\
& - \frac{i_{L_2}(k) + i_{L_2}(k+1)}{2} - \frac{i_{L_{1w}}(k) + i_{L_{1w}}(k+1)}{2} - \frac{i_1(k) + i_1(k+1)}{2}, \\
& \frac{C_{1w}(k+1) \cdot u_{C_{1w}}(k+1) - C_{1w}(k) \cdot u_{C_{1w}}(k)}{h} = \frac{i_{L_{1w}}(k) + i_{L_{1w}}(k+1)}{2}, \\
& \frac{C_2(k+1) \cdot u_{C_2}(k+1) - C_2(k) \cdot u_{C_2}(k)}{h} = \frac{i_{L_2}(k) + i_{L_2}(k+1)}{2} - \\
& - \frac{i_{G_2}(k) + i_{G_2}(k+1)}{2} - \frac{i_{L_3}(k) + i_{L_3}(k+1)}{2} - \frac{i_{L_{2w}}(k) + i_{L_{2w}}(k+1)}{2} + \\
& - \frac{i_2(k) + i_2(k+1)}{2}, \\
& \frac{C_{2w}(k+1) \cdot u_{C_{2w}}(k+1) - C_{2w}(k) \cdot u_{C_{2w}}(k)}{h} = \frac{i_{L_{2w}}(k) + i_{L_{2w}}(k+1)}{2}, \\
& \dots \\
& \frac{C_N(k+1) \cdot u_{C_N}(k+1) - C_N(k) \cdot u_{C_N}(k)}{h} = \frac{i_{L_N}(k) + i_{L_N}(k+1)}{2} - \\
& - \frac{i_{G_N}(k) + i_{G_N}(k+1)}{2} - \frac{i_{L_{N+1}}(k) + i_{L_{N+1}}(k+1)}{2} - \frac{i_N(k) + i_N(k+1)}{2}, \\
& \frac{C_{Nw}(k+1) \cdot u_{C_{Nw}}(k+1) - C_{Nw}(k) \cdot u_{C_{Nw}}(k)}{h} = \frac{i_{L_{Nw}}(k) + i_{L_{Nw}}(k+1)}{2}.
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Atliekamas (2.6) ir (2.7) lygčių supaprastinimas ją padauginant atitinkamai iš $h/L(k+1)$ ir $h/C(k+1)$, bei lygčių narius sukeltiant į vieną pusę, o lygtis prilyginant nuliui, gaunamos (2.8) ir (2.9) išraiškos.

Iš (2.8) ir (2.9) lygčių sudaroma tiesinės lygčių sistemos matrica ir laisvųjų narių stulpelis.

$$\begin{aligned}
& i_{L_1}(k+1) - \frac{L_1(k) \cdot i_{L_1}(k)}{L_1(k+1)} - \frac{h}{L_1(k+1)} e + \frac{h}{2L_1(k+1)} u_R(k) + \frac{h}{2L_1(k+1)} u_R(k+1) + \\
& + \frac{h}{2L_1(k+1)} u_{R1a}(k) + \frac{h}{2L_1(k+1)} u_{R1a}(k+1) + \frac{h}{2L_1(k+1)} u_{C_1}(k) + \\
& + \frac{h}{2L_1(k+1)} u_{C_1}(k+1) = 0, \\
& i_{L_2}(k+1) - \frac{L_2(k) \cdot i_{L_2}(k)}{L_2(k+1)} - \frac{h}{2L_2(k+1)} u_{C_1}(k) - \frac{h}{2L_2(k+1)} u_{C_1}(k+1) + \\
& + \frac{h}{2L_2(k+1)} u_{R1b}(k) + \frac{h}{2L_2(k+1)} u_{R1b}(k+1) + \frac{h}{2L_2(k+1)} u_{R2a}(k) + \\
& + \frac{h}{2L_2(k+1)} u_{R2a}(k+1) + \frac{h}{2L_2(k+1)} u_{C_2}(k) + \frac{h}{2L_2(k+1)} u_{C_2}(k+1) = 0, \\
& i_{L_{1w}}(k+1) - \frac{L_{1w}(k) \cdot i_{L_{1w}}(k)}{L_{1w}(k+1)} - \frac{h}{2L_{1w}(k+1)} u_{C_1}(k) - \frac{h}{2L_{1w}(k+1)} u_{C_1}(k+1) + \\
& + \frac{h}{2L_{1w}(k+1)} u_{R1w}(k) + \frac{h}{2L_{1w}(k+1)} u_{R1w}(k+1) + \frac{h}{2L_{1w}(k+1)} u_{C_{1w}}(k) + \\
& + \frac{h}{2L_{1w}(k+1)} u_{C_{1w}}(k+1) = 0, \\
& i_{L_3}(k+1) - \frac{L_3(k) \cdot i_{L_3}(k)}{L_3(k+1)} - \frac{h}{2L_3(k+1)} u_{C_2}(k) - \frac{h}{2L_3(k+1)} u_{C_2}(k+1) + \\
& + \frac{h}{2L_3(k+1)} u_{R2b}(k) + \frac{h}{2L_3(k+1)} u_{R2b}(k+1) + \frac{h}{2L_3(k+1)} u_{R3a}(k) + \\
& + \frac{h}{2L_3(k+1)} u_{R3a}(k+1) + \frac{h}{2L_3(k+1)} u_{C_3}(k) + \frac{h}{2L_3(k+1)} u_{C_3}(k+1) = 0, \\
& i_{L_{2w}}(k+1) - \frac{L_{2w}(k) \cdot i_{L_{2w}}(k)}{L_{2w}(k+1)} - \frac{h}{2L_{2w}(k+1)} u_{C_2}(k) - \frac{h}{2L_{2w}(k+1)} u_{C_2}(k+1) + \\
& + \frac{h}{2L_{2w}(k+1)} u_{R2w}(k) + \frac{h}{2L_{2w}(k+1)} u_{R2w}(k+1) + \frac{h}{2L_{2w}(k+1)} u_{C_{2w}}(k) + \\
& + \frac{h}{2L_{2w}(k+1)} u_{C_{2w}}(k+1) = 0, \\
& \dots\dots\dots \\
& i_{L_N}(k+1) - \frac{L_N(k) \cdot i_{L_N}(k)}{L_N(k+1)} - \frac{h}{2L_N(k+1)} u_{C_N}(k) - \frac{h}{2L_N(k+1)} u_{C_N}(k+1) + \\
& + \frac{h}{2L_N(k+1)} i_{R_{bN}}(k) + \frac{h}{2L_N(k+1)} i_{R_{bN}}(k+1) + \frac{h}{2L_N(k+1)} R_{A^i L_A}(k) + \\
& + \frac{h}{2L_N(k+1)} R_{A^i L_{N+1}}(k+1) = 0, \\
& i_{L_{Nw}}(k+1) - \frac{L_{Nw}(k) \cdot i_{L_{Nw}}(k)}{L_{Nw}(k+1)} - \frac{h}{2L_{Nw}(k+1)} u_{C_N}(k) - \frac{h}{2L_{Nw}(k+1)} u_{C_N}(k+1) + \\
& + \frac{h}{2L_{Nw}(k+1)} u_{R_{Nw}}(k) + \frac{h}{2L_{Nw}(k+1)} u_{R_{Nw}}(k+1) + \frac{h}{2L_{Nw}(k+1)} u_{C_{Nw}}(k) + \\
& + \frac{h}{2L_{Nw}(k+1)} u_{C_{Nw}}(k+1) = 0,
\end{aligned} \tag{2.8}$$

$$\begin{aligned}
& u_{C_1}(k+1) - \frac{C_1(k) \cdot u_{C_1}(k)}{C_1(k+1)} - \frac{h}{2C_1(k+1)} i_{L_1}(k) - \frac{h}{2C_1(k+1)} i_{L_1}(k+1) + \frac{h}{2C_1(k+1)} i_{G_1}(k) + \\
& + \frac{h}{2C_1(k+1)} i_{G_1}(k+1) + \frac{h}{2C_1(k+1)} i_{L_2}(k) + \frac{h}{2C_1(k+1)} i_{L_2}(k+1) + \frac{h}{2C_1(k+1)} i_{L_{1w}}(k) + \\
& + \frac{h}{2C_1(k+1)} i_{L_{1w}}(k+1) + \frac{h}{2C_1(k+1)} i_1(k) + \frac{h}{2C_1(k+1)} i_1(k+1) = 0, \\
& u_{C_{1w}}(k+1) - \frac{C_{1w}(k) \cdot u_{C_{1w}}(k)}{C_{1w}(k+1)} - \frac{h}{2C_{1w}(k+1)} i_{L_{1w}}(k) - \frac{h}{2C_{1w}(k+1)} i_{L_{1w}}(k+1) = 0, \\
& u_{C_2}(k+1) - \frac{C_2(k) \cdot u_{C_2}(k)}{C_2(k+1)} - \frac{h}{2C_2(k+1)} i_{L_2}(k) - \frac{h}{2C_2(k+1)} i_{L_2}(k+1) + \\
& + \frac{h}{2C_2(k+1)} i_{G_2}(k) + \frac{h}{2C_2(k+1)} i_{G_2}(k+1) + \frac{h}{2C_2(k+1)} i_{L_3}(k) + \frac{h}{2C_2(k+1)} i_{L_3}(k+1) + \\
& + \frac{h}{2C_2(k+1)} i_{L_{2w}}(k) + \frac{h}{2C_2(k+1)} i_{L_{2w}}(k+1) + \frac{h}{2C_2(k+1)} i_2(k) + \frac{h}{2C_2(k+1)} i_2(k+1) = 0, \quad (2.9) \\
& u_{C_{2w}}(k+1) - \frac{C_{2w}(k) \cdot u_{C_{2w}}(k)}{C_{2w}(k+1)} - \frac{h}{2C_{2w}(k+1)} i_{L_{2w}}(k) - \frac{h}{2C_{2w}(k+1)} i_{L_{2w}}(k+1) = 0, \\
& \dots\dots\dots \\
& u_{C_N}(k+1) - \frac{C_N(k) \cdot u_{C_N}(k)}{C_N(k+1)} - \frac{h}{2C_N(k+1)} i_{L_N}(k) - \frac{h}{2C_N(k+1)} i_{L_N}(k+1) + \\
& + \frac{h}{2C_N(k+1)} i_{G_N}(k) + \frac{h}{2C_N(k+1)} i_{G_N}(k+1) + \frac{h}{2C_N(k+1)} i_{L_{N+1}}(k) + \\
& + \frac{h}{2C_N(k+1)} i_{L_{N+1}}(k+1) + \frac{h}{2C_N(k+1)} i_N(k) + \frac{h}{2C_N(k+1)} i_N(k+1) = 0, \\
& u_{C_{Nw}}(k+1) - \frac{C_{Nw}(k) \cdot u_{C_{Nw}}(k)}{C_{Nw}(k+1)} - \frac{h}{2C_{Nw}(k+1)} i_{L_{Nw}}(k) - \frac{h}{2C_{Nw}(k+1)} i_{L_{Nw}}(k+1) = 0.
\end{aligned}$$

Matricos sudarymą nulemia nežinomųjų stulpelio parinkimas. Nežinomuosius sujungiamo į stulpelį tokia tvarka:

- vienam segmentui aprašome keturis nežinomuosius;
- i segmento nežinomieji išdėstyti tvarka: srovė stipris per induktyvumą L_i , įtampa ant talpos C_i , srovės stipris per induktyvumą L_{iw} , įtampa ant talpos C_{iw} .

Tokiu būdu gauname stulpelį, kurio 1 eilutė – I_{L1} , 2 eilutė – U_{C1} , 3 eilutė – I_{L1w} , 4 eilutė – U_{C1w} , 5 eilutė – I_{L2} , 6 eilutė – U_{C2} , 7 eilutė – I_{L2w} , 8 eilutė – U_{C2w} , ir taip toliau.

Matricos nulinių ir nenulinių elementų išdėstymas pavaizduotas (2.10) lygtyje. Matricos elementai, kurie nėra nuliniai, pažymėti + ženklu, nuliniai elementai – 0. (2.10) lygtyje taip pat pateiktos nenulinių elementų lygtys. Laisvųjų narių stulpelis parodytas (2.11) lygtyje.

$$\left(\begin{array}{cccccccccccccccccccc} + & + & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ + & + & + & 0 & + & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & + & + & + & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & + & + & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & + & 0 & 0 & + & + & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & + & + & + & 0 & + & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & + & + & + & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & + & + & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & + & 0 & 0 & + & + & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & + & + & + & 0 & + \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & + & + & + & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & + & + & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & + & + \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & + \end{array} \right)$$

(2.10)

$$A_{11} = 1 + h \frac{R_g + R_a}{2(L_g + L_a)}; \quad A_{12} = \frac{h}{2(L_g + L_a)}; \quad A_{21} = -\frac{h}{2C_1}; \quad A_{22} = 1 + h \frac{G_1}{2C_1};$$

$$A_{23} = \frac{h}{2C_1}; \quad A_{25} = -\frac{h}{2C_1}; \quad A_{32} = -\frac{h}{2L_{1w}}; \quad A_{33} = 1 + h \frac{R_{1w}}{2L_{1w}}; \quad A_{34} = \frac{h}{2L_{1w}};$$

$$A_{43} = -\frac{h}{2C_{1w}}; \quad A_{44} = 1; \quad A_{52} = -\frac{h}{2(L_{2a} + L_{1b})}; \quad A_{55} = 1 + h \frac{R_{2a} + R_{2b}}{2(L_{2a} + L_{1b})};$$

$$A_{56} = \frac{h}{2(L_{2a} + L_{1b})}; \quad A_{65} = -\frac{h}{2C_2}; \quad A_{66} = 1 + h \frac{G_2}{2C_2}; \quad A_{67} = \frac{h}{2C_2};$$

$$A_{69} = \frac{h}{2C_2}; \quad A_{76} = -\frac{h}{2L_{2w}}; \quad A_{77} = 1 + h\frac{R_{2w}}{2L_{2w}}; \quad A_{78} = \frac{h}{2L_{2w}};$$

$$A_{87} = -\frac{h}{2C_{2w}}; \quad A_{88} = 1;$$

$$A_{N-3N-6} = -\frac{h}{2(L_{Na} + L_{(N-1)b})}; \quad A_{N-3N-3} = 1 + h\frac{(R_{Na} + R_{(N-1)b})}{2(L_{Na} + L_{(N-1)b})};$$

$$A_{N-3N-2} = \frac{h}{2(L_{Na} + L_{(N-1)b})}; \quad A_{N-2N-3} = -\frac{h}{2C_N};$$

$$A_{N-2N-2} = 1 + \frac{hG_N}{2C_N}; \quad A_{N-2N-1} = A_{N-2N+1} = \frac{h}{2C_N}; \quad A_{N-1N-2} = -\frac{h}{2L_{Nw}};$$

$$A_{N-1N-1} = 1 + \frac{hR_{Nw}}{2L_{Nw}}; \quad A_{N-1N} = \frac{h}{2L_{Nw}}; \quad A_{NN-1} = -\frac{h}{2C_{Nw}}; \quad A_{NN} = 1;$$

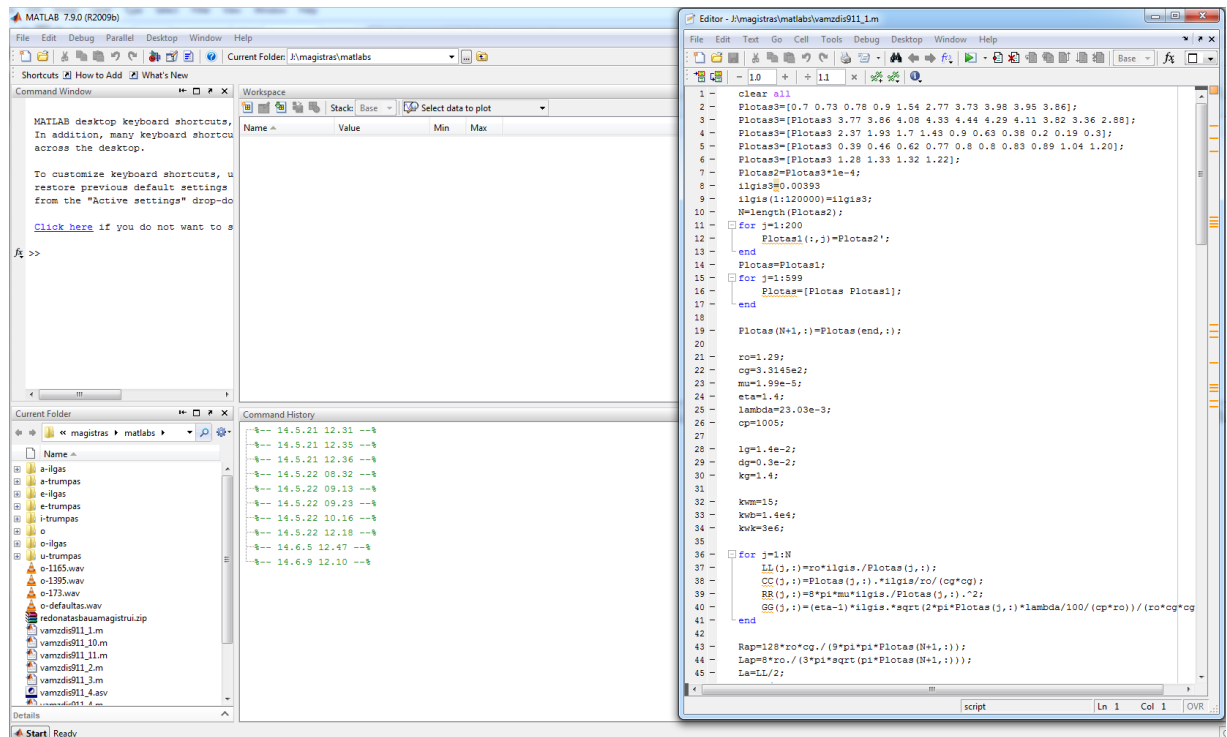
$$A_{N+1N} = -\frac{h}{2L_{Nb}}; \quad A_{N+1N+1} = 1 + h\frac{R_{Nb} + R_A}{2L_{Nb}}; \quad A_{N+1N+2} = -\frac{hR_A}{2L_{Nb}};$$

$$A_{N+2N+1} = -\frac{hR_A}{2L_A}; \quad A_{N+2N+2} = 1 + \frac{hR_A}{2L_A};$$

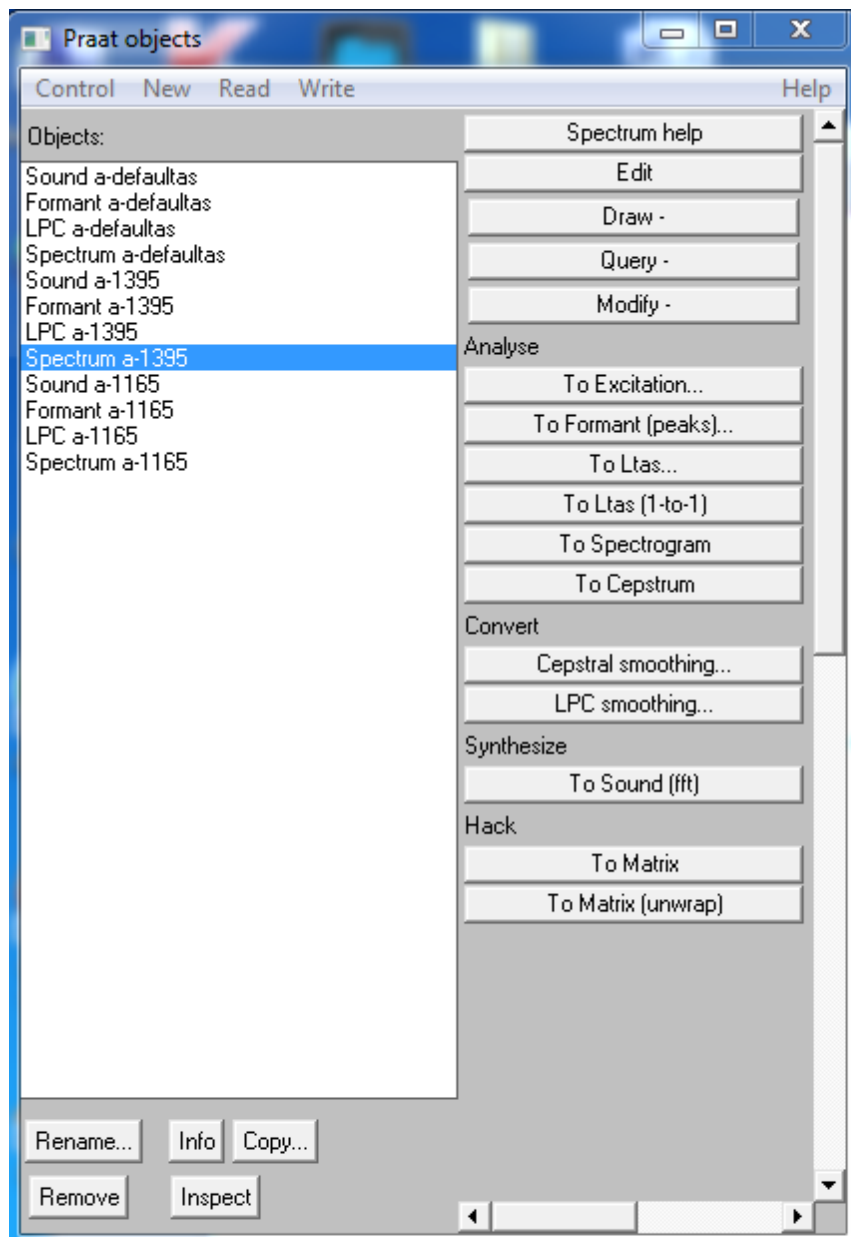
$$\begin{aligned}
& \left(\frac{L_g(k) + L_{1a}(k)}{L_g(k+1) + L_{1a}(k+1)} - h \frac{R_g(k) + R_{1a}(k)}{2(L_g(k+1) + L_{1a}(k+1))} \right) \cdot X_1(k) + \\
& + \frac{h}{2(L_g(k+1) + L_{1a}(k+1))} \cdot (-X_2(k)) + 2E; \\
& \frac{h}{2C_1(k+1)} \cdot S_1(k) + \left(\frac{C_1(k)}{C_1(k+1)} - \frac{h \cdot G_1(k)}{2C_1(k+1)} \right) \cdot X_2(k) - \left(\frac{h}{2C_1(k+1)} \right) \cdot X_3(k) - \\
& - \left(\frac{h}{2C_1(k+1)} \right) \cdot X_5(k) - \frac{S_1(k+1)\Delta x(k+1) - S_1(k)\Delta x(k)}{C_1(k+1)}; \\
& \frac{h}{2L_{1w}(k+1)} \cdot S_2(k) + \left(\frac{L_{1w}(k)}{L_{1w}(k+1)} - \frac{h \cdot R_{1w}(k)}{2L_{1w}(k+1)} \right) \cdot X_3(k) - \left(\frac{h}{2L_{1w}(k+1)} \right) \cdot X_4(k); \\
& \left(\frac{h}{2C_{1w}(k+1)} \right) \cdot X_3(k) + \left(\frac{C_{1w}(k)}{C_{1w}(k+1)} \right) \cdot X_4(k); \\
& \left(\frac{h}{2(L_{2a}(k+1) + L_{1b}(k+1))} \right) \cdot (X_2(k) - X_6(k)) + \\
& + \frac{\left(L_{2a}(k) + L_{1b}(k) - h \frac{R_{2a}(k) + R_{1b}(k)}{2} \right)}{(L_{2a}(k+1) + L_{1b}(k+1))} \cdot X_5(k); \\
& \frac{h}{2(C_2(k+1))} \cdot (X_5(k) - X_9(k) - X_7(k)) + \left(\frac{C_2(k)}{C_2(k+1)} - h \frac{G_2(k)}{2C_2(k+1)} \right) \cdot X_6(k); \\
& \frac{h}{2L_{2w}(k+1)} \cdot X_6(k) + \left(\frac{L_{2w}(k)}{L_{2w}(k+1)} - \frac{h \cdot R_{2w}(k)}{2L_{2w}(k+1)} \right) \cdot X_7(k) - \frac{h}{2L_{2w}(k+1)} \cdot X_8(k); \\
& \frac{h}{2C_{2w}(k+1)} \cdot X_7(k) + \frac{C_{2w}(k)}{C_{2w}(k+1)} \cdot X_8(k) - \frac{S_2(k+1)\Delta x(k+1) - S_2(k)\Delta x(k)}{C_2(k+1)}; \tag{2.11} \\
& \dots \\
& \frac{h}{2(L_{Na}(k+1) + L_{(N-1)b}(k+1))} \cdot (X_{4N-6}(k) - X_{4N-2}(k)) + \\
& + \frac{\left(L_{Na}(k) + L_{(N-1)b}(k) - h \frac{R_{Na}(k) + R_{(N-1)b}(k)}{2} \right)}{L_{Na}(k+1) + L_{(N-1)b}(k+1)} \cdot X_{4N-3}(k); \\
& \frac{h}{2C_N(k+1)} \cdot (X_{4N-3}(k) - X_{4N+1}(k) - X_{4N-1}(k)) + \left(\frac{C_N(k)}{C_N(k+1)} - h \frac{G_N(k)}{2C_N(k+1)} \right) \cdot \\
& \cdot X_{4N-2}(k) - \frac{S_N(k+1)\Delta x(k+1) - S_N(k)\Delta x(k)}{C_N(k+1)}; \\
& \frac{h}{2L_{Nw}(k+1)} \cdot X_{4N-2}(k) + \left(\frac{L_{Nw}(k)}{L_{Nw}(k+1)} - \frac{h \cdot R_{Nw}(k)}{2L_{Nw}(k+1)} \right) \cdot X_{4N-1}(k) - \\
& - \frac{h}{2L_{Nw}(k+1)} \cdot X_{4N}; \\
& \frac{h}{2C_{Nw}(k+1)} \cdot X_{4N-1}(k) + \frac{C_{Nw}(k)}{C_{Nw}(k+1)} \cdot X_{4N}(k); \\
& \frac{h}{2L_{Nb}(k)} \cdot (X_{4N-2}(k)) + \left(1 - h \frac{R_{Nb}(k) + R_A(k)}{2L_{Nb}(k)} \right) \cdot X_{4N+1}(k) + \frac{R_A(k) \cdot h}{2L_{Nb}(k)} \cdot X_{4N+2}(k); \\
& \frac{h \cdot R_A(k)}{2L_A(k)} \cdot X_{4N+1}(k) + \left(1 - \frac{h \cdot R_A(k)}{2L_A(k)} \right) \cdot X_{4N+2}(k);
\end{aligned}$$

3. TYRIMO ĮGYVENDINIMAS

Kalbos trakto perdavimo funkcijai sumodeliuoti ir ištirti buvo pasirinktas MatLab2009b programų paketas ir garso signalų tyrimo programa Praat. MatLab2009b pagalba sugeneruojamas sintezuotas balsis, kuris išsaugomas wav plėtiniu (1 priedas). Sugeneruotas garsas Praat programa ištiriamas ir pateikiami grafikai (2 priedas).



7 pav. MatLab2009b programos aplinka

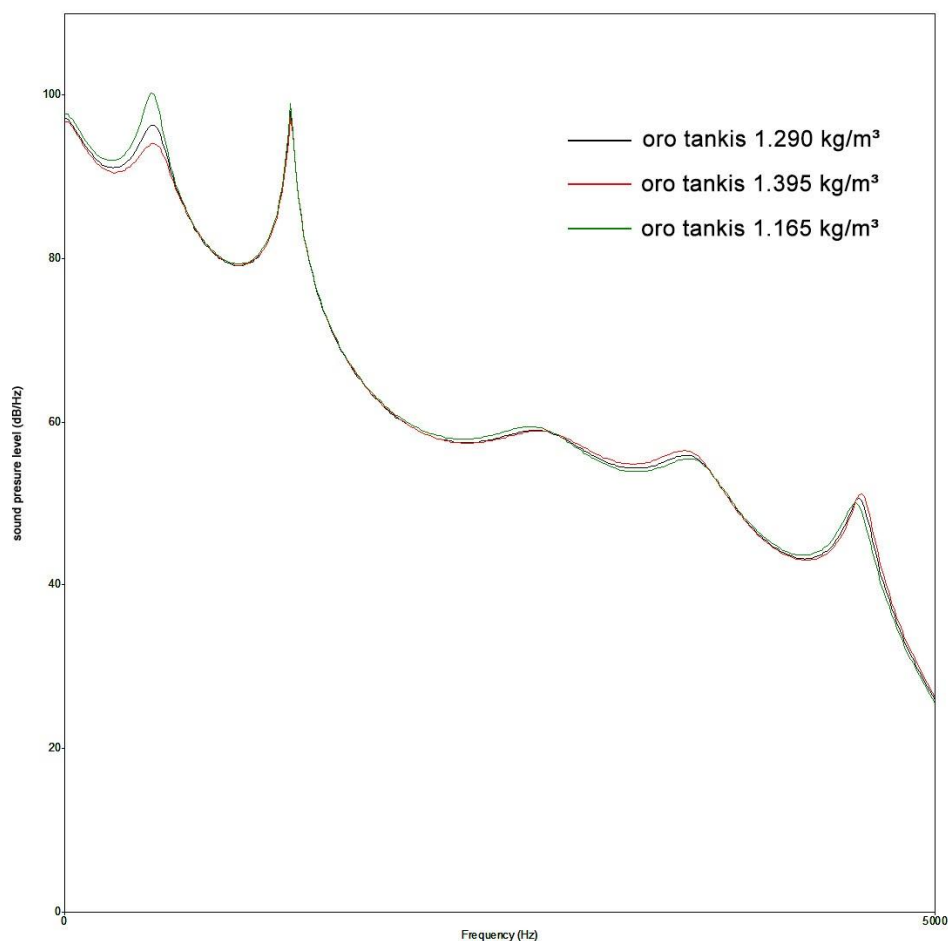


8 pav. Praat programos aplinka

4. TYRIMO REZULTATAI

Mano darbo tikslas pasinaudojant elektronines priemones eksperimentiškai ištirti kaip kalbos trakto parametrai įtakoja sintezuojamą kalbą (balses). Oro tankio reikšmės buvo pasirinktos: orientacinė – $1,29\text{kg/m}^3$ prie $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1,395\text{kg/m}^3$ prie $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $1,165\text{kg/m}^3$ prie $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Susintezuoto trumpojo a balsio formantų parametrų priklausomybė nuo oro tankio kitimo pavaizduota 9 pav.



9 pav. a trumpo balsio formantai keičiantis oro tankiui.

Iš grafiko matyti, jog kintant oro tankiui trumpo a balsio formanto F2 reikšmės keičiasi nežymiai. Ryškesni darnio pasikeitimai matomi F1 didėjant ir mažėjant oro tankiui. Bei mažėjant oro tankiui išryškėja F3 dažnio padidėjimas (1,2%) 1 lentelė.

1 lentelė. Formantų dažnių pokytis keičiantis oro tankiui.

Formantai	1.29kg/m ³	1.395kg/m ³	pokytis%	1.165kg/m ³	pokytis%
F1	520	530	1,9230769	510	-1,92308
F2	1296	1299	0,2314815	1300	0,308642
F3	2700	2702	0,0740741	2719	0,703704
F4	3575	3589	0,3916084	3618	1,202797
F5	4611	4608	-0,065062	4573	-0,82412

Kas liečia formantų energiją (2 lentelė), vėl išryškėja pokyčiai F1. Padidinus oro tankį, F1 energija krenta 2,3%, o sumažinus oro tankį energija padidėja net 3,9%. Taip pat 1,2% padidėja ir F2 energija.

2 lentelė. Formantų energijos pokytis keičiantis oro tankiui.

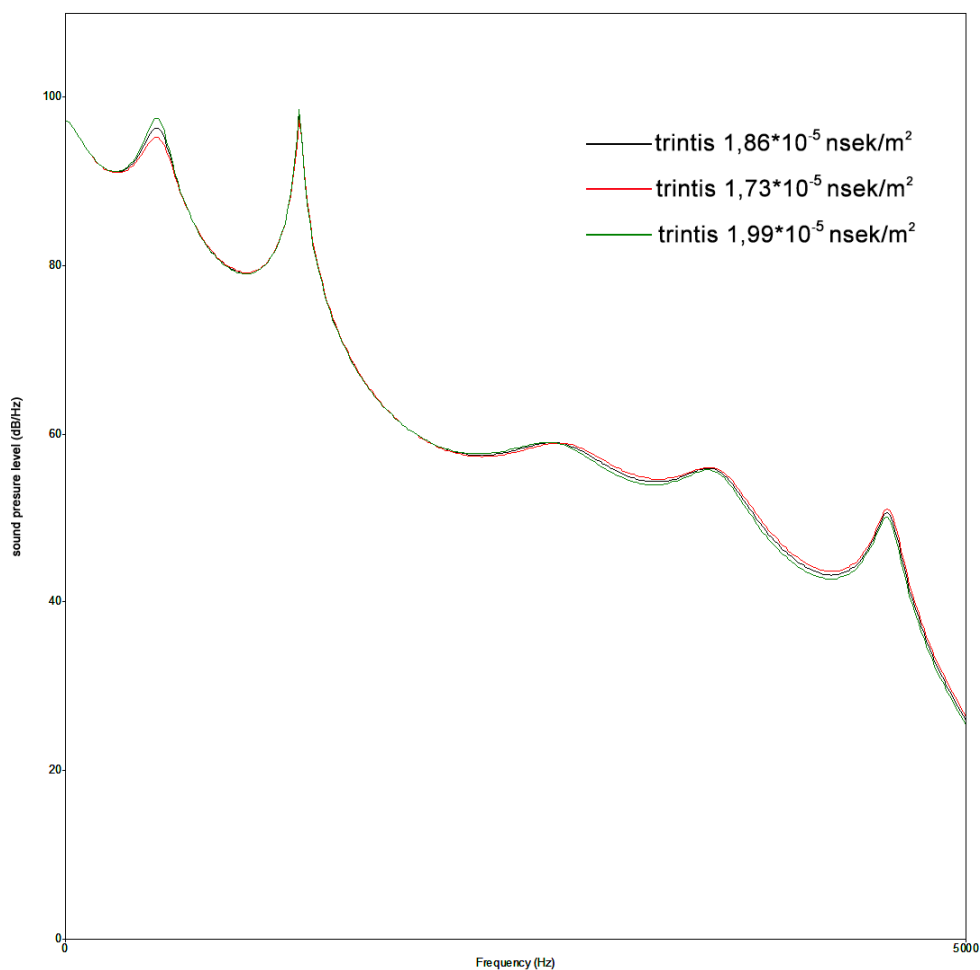
Formantai	1.29kg/m ³	1.395kg/m ³	pokytis%	1.165kg/m ³	pokytis%
F1	96,5	94,2	-2,38342	100,3	3,937824
F2	97,9	97,3	-0,61287	99	1,123596
F3	59,1	59	-0,169205	59,5	0,676819
F4	56	56,5	0,8928571	55,5	-0,89286
F5	50,7	51,2	0,9861933	50,2	-0,98619

Sekančiame grafike matyti kaip kinta a trumposios balsio formantų parametrai kintant trinties į kalbos trakto akustinio vamzdžio sienelės koeficientui (3 ir 4 lentelės).

3 lentelė. Formantų dažnių pokytis keičiantis trinties koeficientui.

Formantai	1,86*10 ⁻⁵ nsek/m ²	1,99*10 ⁻⁵ nsek/m ²	pokytis%	1,73*10 ⁻⁵ nsek/m ²	pokytis%
F1	520	518	-0,384615	518	-0,38462
F2	1296	1299	0,2314815	1299	0,231481
F3	2700	2645	-2,037037	2689	-0,40741
F4	3575	3591	0,4475524	3613	1,062937
F5	4611	4590	-0,455433	4593	-0,39037

Ryškesniu pasikeitimu nėra išskyrus padidėjus trinčiai, 2,03% sumažėja F3 dažnis. Sumažinus trinties koeficientą, F4 dažnis šokteli 1,06% (3 lentelė).

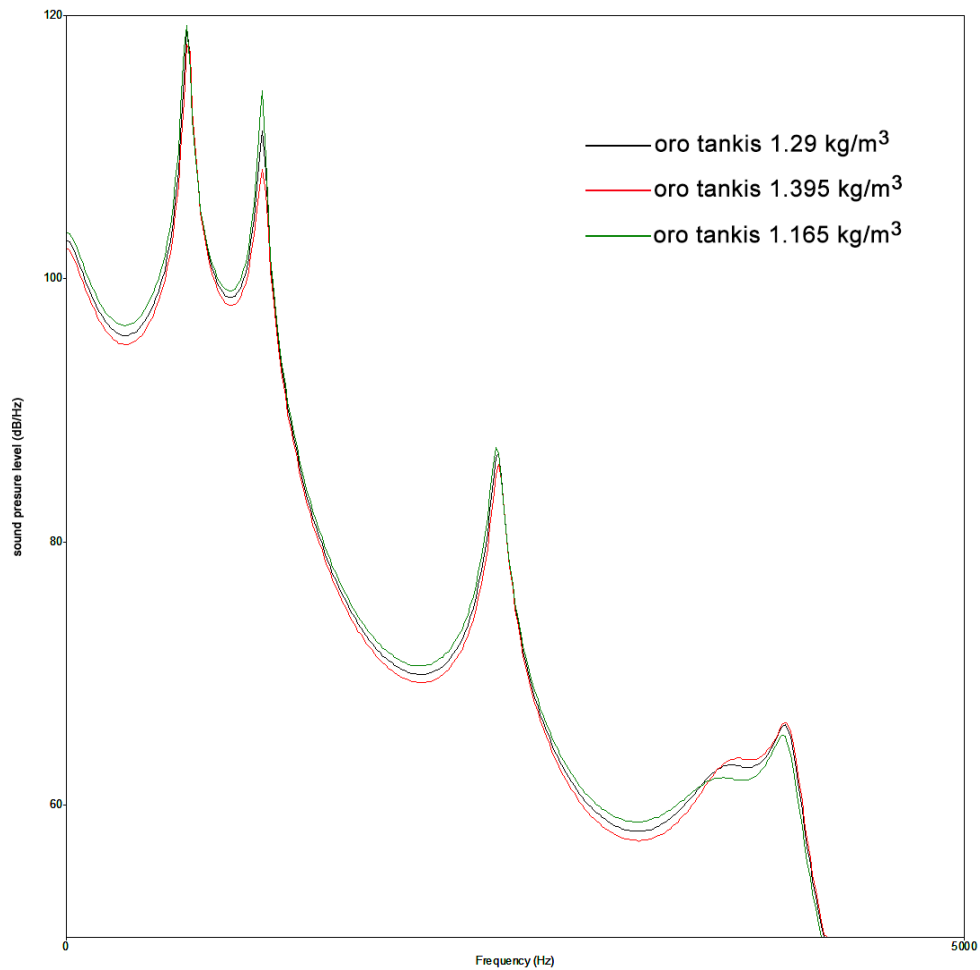


10 pav. a trumpo balsio formantai keičiantis trinties koeficientui.

Keičiantis trinties koeficiento dydžiui, didesnis energijos pokytis pastebimas F1 ir F5 formantuose (4 lentelė).

4 lentelė. A trumpo balsio formantų energijos pokytis keičiantis trinties koeficientui.

Formantai	$1,86 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	$1,99 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	pokytis%	$1,73 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	pokytis%
F1	96,5	97,5	1,0362694	95,3	-1,24352
F2	97,9	98,5	0,6128703	97,2	-0,71502
F3	59,1	59,1	0	59	-0,1692
F4	56	55,8	-0,357143	56,1	0,178571
F5	50,7	50,2	-0,986193	51,2	0,986193



11 pav. a ilgo balsio formantai keičiantis oro tankiui.

Aukščiau esančiam grafike matyti, kad keičiant oro tankį generuojamam ilgam a balsiui, skirtingai nei trumpam a, ženkliau kinta F2 ir F4 formantų energija.

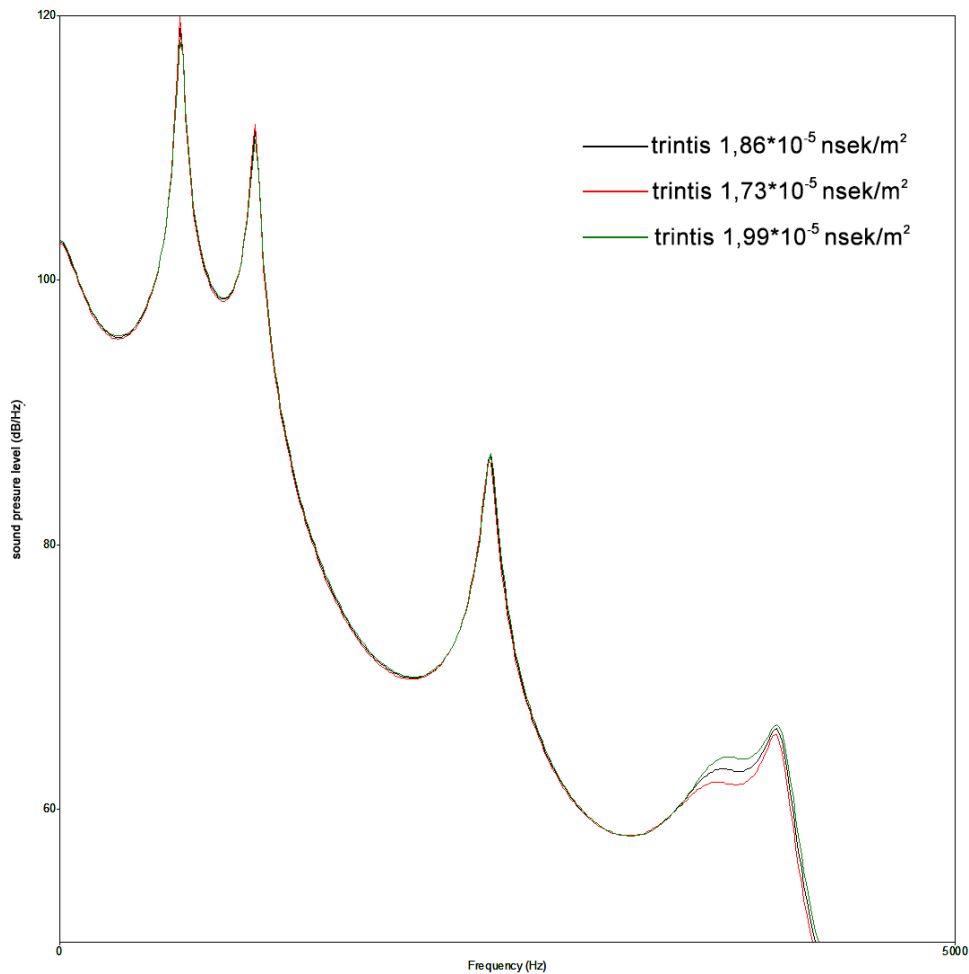
5 lentelė. A ilgo balsio formantų energijos pokytis keičiantis oro tankiui.

Formantai	1.29kg/m ³	1.395kg/m ³	pokytis%	1.165kg/m ³	pokytis%
F1	118,9	117,8	-0,925147	119,1	0,168209
F2	111,2	108,3	-2,607914	114,3	2,78777
F3	86,8	85,9	-1,036866	87,2	0,460829
F4	63	63,6	0,952381	62	-1,5873
F5	66,2	66,4	0,3021148	65,3	-1,35952

O dažnių kitimo lentelėje išsiskiria F1 ir F3.

6 lentelė A ilgo balsio formantų dažnių pokytis keičiantis oro tankiui.

Formantai	1.29kg/m ³	1.395kg/m ³	pokytis%	1.165kg/m ³	pokytis%
F1	673	677	0,5943536	666	-1,04012
F2	1089	1089	0	1087	-0,18365
F3	2402	2406	0,1665279	2397	-0,20816
F4	3663	3690	0,7371007	3637	-0,7098
F5	4034	4040	0,1487357	4017	-0,42142



12 pav. a ilgo balsio formantai keičiantis trinties koeficientui.

Grafike didžiausias pokytis matomas F4. 4 lentelėje pateikti duomenys patvirtina ryškesnį F4 dažnio pokytį priklausanti nuo trinties koeficiento dydžio.

7 lentelė. A ilgo balsio formantų dažnių pokytis keičiantis trinties koeficientui.

Formantai	$1,86 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	$1,99 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	pokytis%	$1,73 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	pokytis%
F1	673	672	-0,148588	674	0,148588
F2	1089	1086	-0,275482	1089	0
F3	2402	2399	-0,124896	2405	0,124896
F4	3663	3646	-0,4641	3686	0,627901
F5	4034	4021	-0,322261	4044	0,247893

Keičiantis trinties koeficientui kinta ne tik F4 dažnis, ženkliai keičiasi ir energija. 8 lentelėje matome, jog padidėjus trinčiai 7%, 1,4% krenta F4 energija, o sumažinus trintį 7% energija išauga 1,58%.

8 lentelė. A ilgo balsio formantų energijos pokytis keičiantis trinties koeficientui.

Formantai	$1,86 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	$1,99 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	pokytis%	$1,73 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	pokytis%
F1	118,9	119,8	0,7569386	118,2	-0,58873
F2	111,2	111,7	0,4496403	110,7	-0,44964
F3	86,8	86,3	-0,576037	87	0,230415
F4	63	62,1	-1,428571	64	1,587302
F5	66,2	65,7	-0,755287	66,5	0,453172

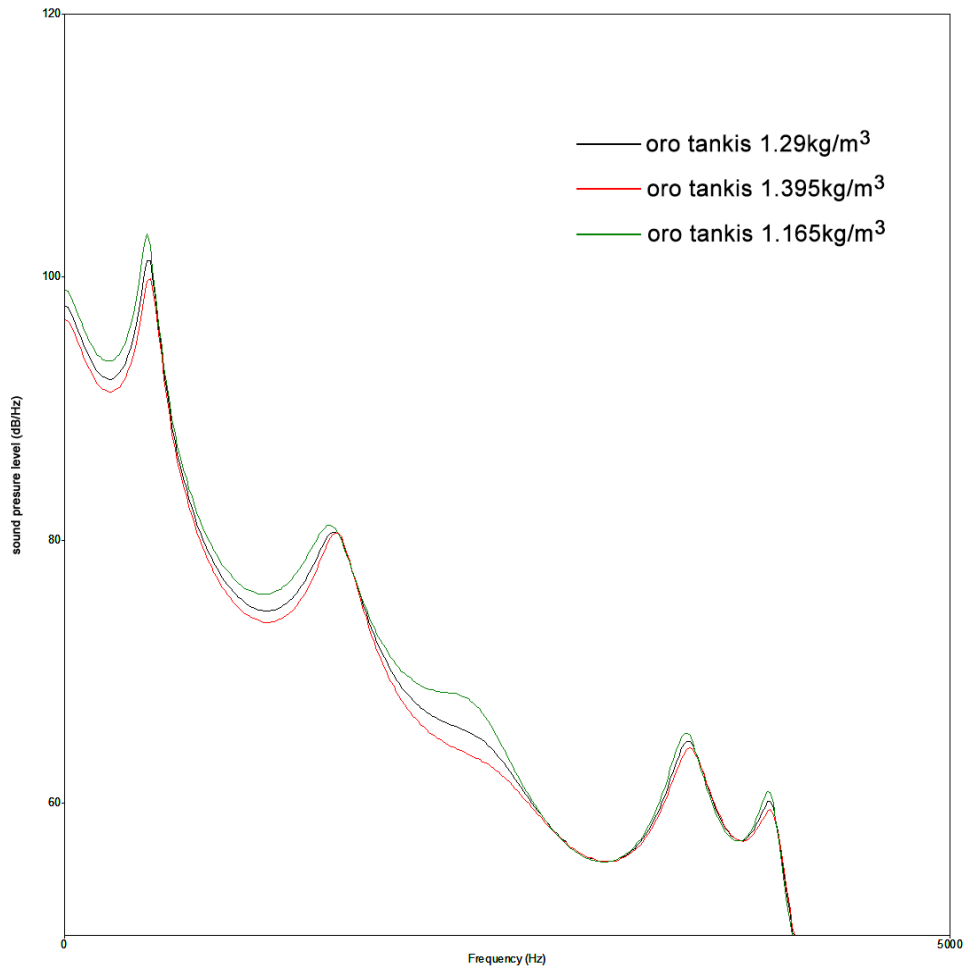
IŠVADOS

Oro tankio ir trinties koeficiento dydžių keitimas turi įtakos sintezuojamo garso formantų energijos ir dažnio dydžiui. Keičiant oro tankį, atsižvelgiant į natūralias oro tankio kitimo sąlygas priklausančias nuo temperatūros (prie -20°C ir 30°C), balsių formančių dažnis ir energija kinta $\pm 1\%$. Kai kuriais retais atvejais pokytis siekia iki $\pm 4\%$. Taigi keičiant oro tankio bei trinties į kalbos trakto sienelės koeficiento dydžius galima nežymiai įtakoti sintezuojamo garso (balsės) parametrus.

LITERATŪRA

1. Balbonas D. BALSŲ SPEKTRO ANALIZĖ. Kaunas – 2009//Prieiga per internet <http://en.ktu.lt/sites/default/files/2009-12-23%20D.%20Balbono%20.pdf>
2. Rudžionis A., Ratkevičius K., Rudžionis V., Kasparaitis P., Šalna B. Projekto "Lietuvių kalbos bazinių elementų diegimas kompiuterinėse sistemose" skyriaus „Balso technologijų taikymo lietuvių kalbai analizė ir perspektyvinių veiklos krypčių pagrindimas“ ataskaita // Prieiga per internetą http://www.likit.lt/frames/balso_tech/balsotech_st.htm
3. Kemėšis P. Kalbos signalo algoritmai. Monografija. – Kaunas: Technologija. 1996. 92 P. ISBN 9986-13-324-6
4. Lipeika A. Formantiniai požymiai atpažįstant kalbą // Informacijos mokslai, 34, ISSN 1392-0561, 2005, p. 215
<http://www.vu.lt/leidyba/dokumentai/zurnalai/INFORMACIJOS%20MOKSLAI/Informacijos%20mokslai%202009%2050/212-216.pdf>
5. Lipeika A. Formantinių požymių išskyrimo metodai // Informacijos mokslai, .42-43, ISSN 392-056 , 2007, p. 201-206.6. Lipeika A., Tamulevičius G. Segmentation of Words into Phones. // Electronics and Electrical Engineering, ISSN 1392-1215, 1(65), 2006, p. 11-15. V <http://www.ee.ktu.lt/journal/2006/1/1392-1215-2006-01-65-11.pdf>
7. Laurinčiukaitė S., Lipeika A. Syllable based Continuous Speech Recognition // Electronics and Electrical Engineering, ISSN 1392-1215, 6 (70), 2006, p. 91-94.
http://www.ktu.lt/lt/mokslas/zurnalai/elektros_z/z70/1392-1215-2006-05-22-91.pdf?origin=publication_detail
8. Kazlauskienė A. Pietiniu vakarų aukštaičių tarmės balsių spektras ir prozodija. Lituania. – 2001. Nr. 3 (47). P. 39-45.
http://fcim.vdu.lt/~asta_kazlauskiene/publikacijos/Pietini%C5%B3%20vakar%C5%B3%20auk%C5%A1tai%C4%8Di%C5%B3%20tarm%C4%97s.pdf
9. Urbanavičienė J. Svirčių šnektos izoliuotų balsių akustinė analizė. // Kalbotyra. 2004. Nr. 53 (1). P. 65-80. ISSN 1392-1517.
<http://etalpykla.lituanistikadb.lt/fedora/get/LT-LDB-0001:J.04~2004~1367159461194/DS.002.0.01.ARTIC>
10. Rabiner L., Juang B.-H. Fundamentals of speech recognition. – Prentice-Hall International. 1993. 277 P. ISBN 0-13-285826-6

PRIEDAI



13 pav. E trumpo balsio formantai keičiantis oro tankiui.

9 lentelė. e trumpo balsio formantų dažnių pokytis keičiantis oro tankiui.

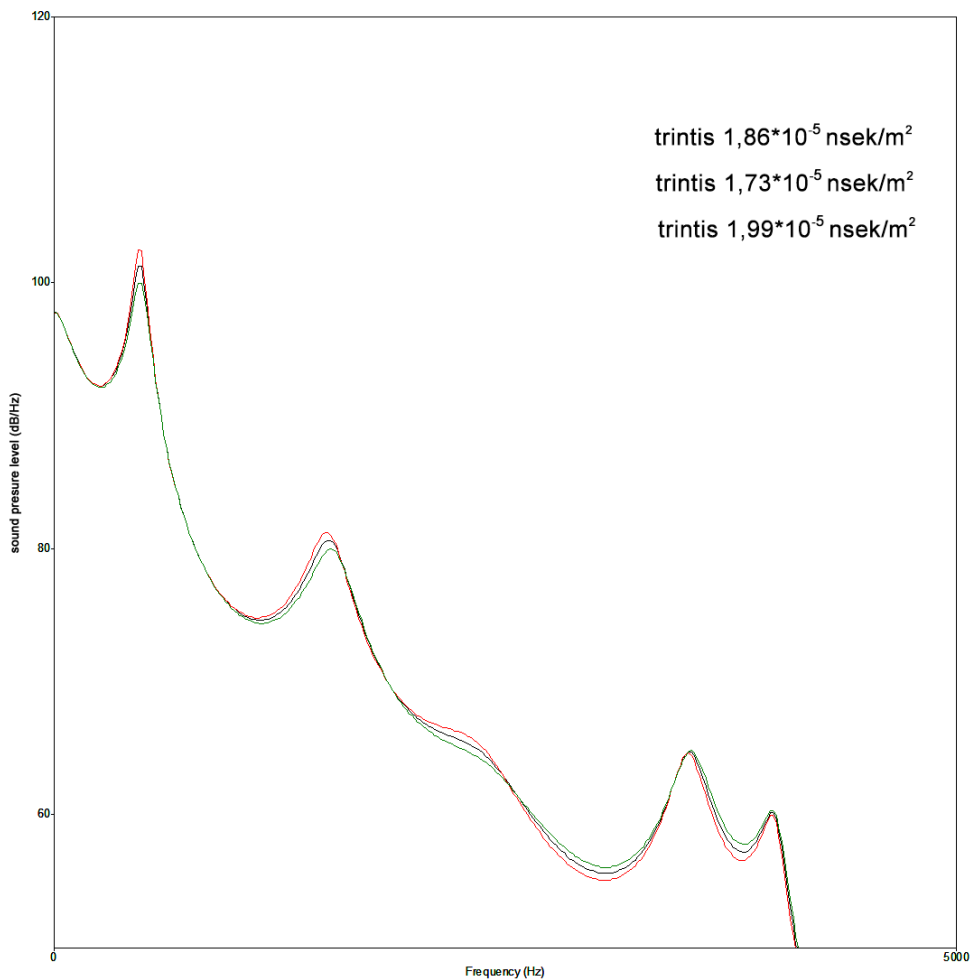
Formantai	1.29kg/m ³	1.395kg/m ³	pokytis%	1.165kg/m ³	pokytis%
F1	480	487	1,4583333	471	-1,875
F2	1546	1561	0,9702458	1521	-1,61708
F3	2382	2434	2,1830395	2325	-2,39295
F4	3531	3537	0,1699235	3520	-0,31153
F5	3987	3993	0,1504891	3980	-0,17557

Čia išsiskiria F1 ir F3 didesniais procentiniais pokyčiais.

10 lentelė. e trumpo balsio formantų energijos pokytis keičiantis oro tankiui.

Formantai	1.29kg/m ³	1.395kg/m ³	pokytis%	1.165kg/m ³	pokytis%
F1	101,2	99,8	-1,383399	103,2	1,976285
F2	80,6	80,6	0	81,2	0,744417
F3	65,1	62,3	-4,301075	67,5	3,686636
F4	64,8	64,3	-0,771605	65,5	1,080247
F5	60,2	59,6	-0,996678	60,9	1,162791

F1 ir F3 formantų energijos kito daugiausiai, keičiant oro tankio didį.



14 pav. E trumpo balsio formantai keičiantis trinties koeficientui.

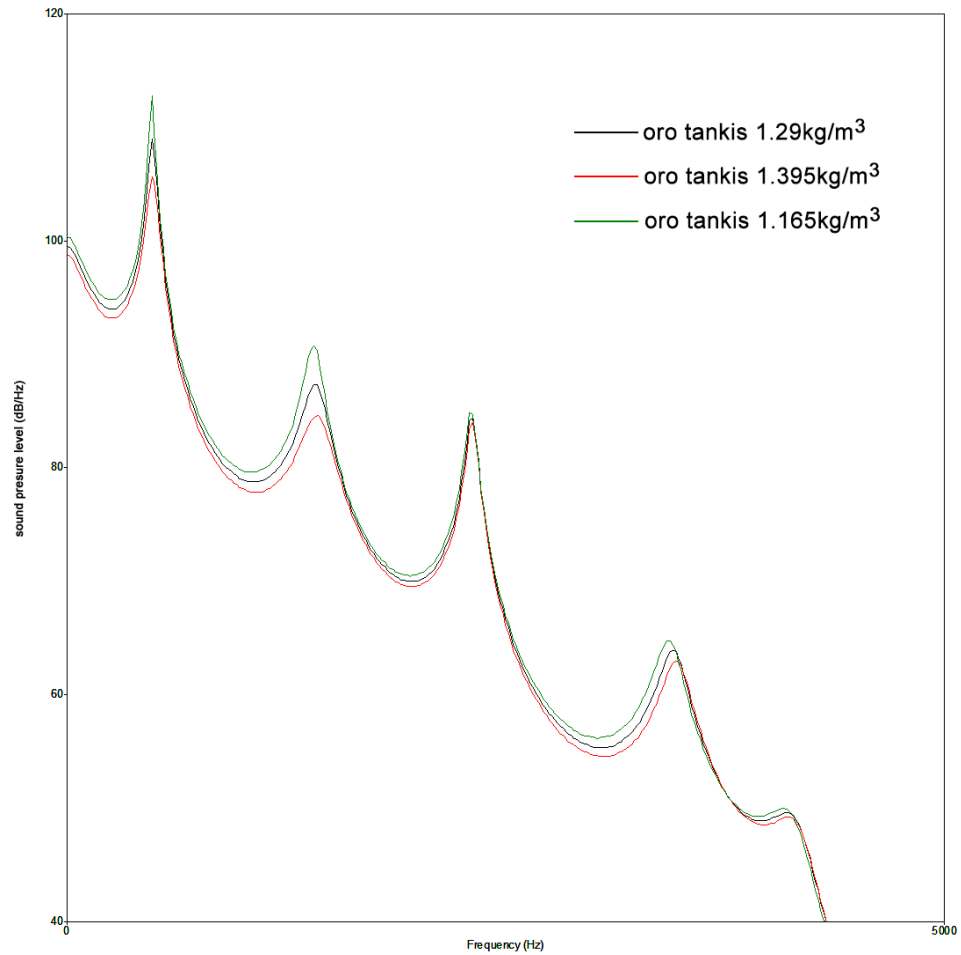
11 lentelė. e trumpo balsio formantų dažnių pokytis keičiantis trinties koeficientui.

Formantai	$1,86 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	$1,99 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	pokytis%	$1,73 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	pokytis%
F1	480	478	-0,416667	483	0,625
F2	1546	1532	-0,905563	1562	1,034929
F3	2382	2354	-1,175483	2413	1,301427
F4	3531	3523	-0,226565	3537	0,169924
F5	3987	3985	-0,050163	3989	0,050163

Keičiant trinties koeficiento dydį, daugiausiai keičiasi F2, F3 dažniai ir

12 lentelė. e trumpo balsio formantų energijos pokytis keičiantis trinties koeficientui.

Formantai	$1,86 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	$1,99 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	pokytis%	$1,73 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	pokytis%
F1	101,2	102,5	1,284585	100	-1,18577
F2	80,6	81,2	0,7444169	80	-0,74442
F3	65,1	65,3	0,3072197	63,7	-2,15054
F4	64,8	64,7	-0,154321	64,8	0
F5	60,2	60	-0,332226	60,4	0,332226



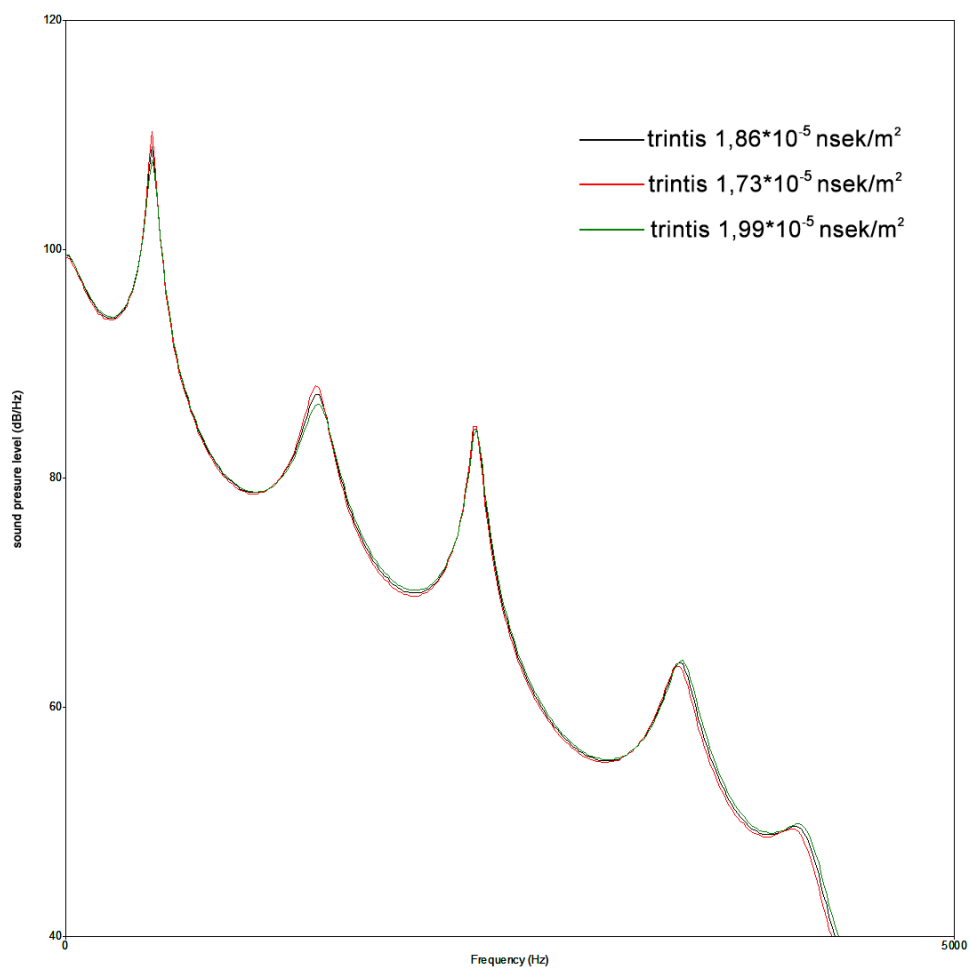
15 pav. E ilgo balsio formantai keičiantis oro tankiui.

13 lentelė. e ilgo balsio formantų dažnių pokytis keičiantis oro tankiui.

Formantai	1.29kg/m ³	1.395kg/m ³	pokytis%	1.165kg/m ³	pokytis%
F1	490	492	0,4081633	487	-0,61224
F2	1425	1435	0,7017544	1412	-0,91228
F3	2323	2325	0,0860956	2316	-0,30133
F4	3468	3486	0,5190311	3442	-0,74971
F5	4184	4195	0,2629063	4160	-0,57361

14 lentelė. e ilgo balsio formantų energijos pokytis keičiantis oro tankiui.

Formantai	1.29kg/m ³	1.395kg/m ³	pokytis%	1.165kg/m ³	pokytis%
F1	109	105,6	-3,119266	112,7	3,394495
F2	87,3	84,6	-3,092784	90,7	3,894616
F3	84,4	84	-0,473934	84,8	0,473934
F4	63,9	63	-1,408451	64,8	1,408451
F5	49,6	49,3	-0,604839	49,8	0,403226



16 pav. E ilgo balsio formantai keičiantis trinties koeficientui.

15 lentelė. e ilgo balsio formantų dažnių pokytis keičiantis trinties koeficientui.

Formantai	$1,86 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	$1,99 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	pokytis%	$1,73 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	pokytis%
F1	490	489	-0,204082	491	0,204082
F2	1425	1418	-0,491228	1432	0,491228
F3	2323	2317	-0,258287	2328	0,215239
F4	3468	3458	-0,288351	3478	0,288351
F5	4184	4170	-0,334608	4197	0,310707

16 lentelė. e ilgo balsio formantų energijos pokytis keičiantis trinties koeficientui.

Formantai	$1,86 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	$1,99 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	pokytis%	$1,73 \cdot 10^{-5}$ nsek/m ²	pokytis%
F1	109	110,3	1,1926606	107,8	-1,10092
F2	87,3	88,2	1,0309278	86,7	-0,68729
F3	84,4	84,7	0,3554502	84,3	-0,11848
F4	63,9	63,6	-0,469484	64,1	0,312989
F5	49,6	49,4	-0,403226	49,8	0,403226

A ilgam balsiui MatLab modelis:

```
clear all

Plotas7=[0.77 0.43 0.25 0.3 0.62 1.1 1.5 1.52 1.12 0.62];
Plotas7=[Plotas7 0.32 0.23 0.28 0.39 0.43 0.49 0.67 0.91 1.15 1.32];
Plotas7=[Plotas7 1.23 0.98 0.99 1.31 1.63 1.82 2.11 2.63 3.18 3.56];
Plotas7=[Plotas7 3.71 3.67 3.51 3.27 3.12 3.03 2.75 2.31 2.01 2.04];
Plotas7=[Plotas7 2.23 2.33 2.25 2.03];
Plotas2=Plotas7*1e-4;
ilgis=0.00372
N=length(Plotas2);
for j=1:200
    Plotas1(:,j)=Plotas2';
end
Plotas=Plotas1;
for j=1:100
    Plotas=[Plotas Plotas1];
end

Plotas(N+1,:)=Plotas(end,:);

ro=1.29;
cg=3.3145e2;
mu=1.99e-5;
eta=1.4;
lambda=23.03e-3;
cp=1005;

lg=1.4e-2;
dg=0.3e-2;
kg=1.4;

kwm=15;
kwb=1.4e4;
kwk=3e6;

LL=ro*ilgis./Plotas;
CC=Plotas*ilgis/ro/(cg*cg);
%RR=ilgis*sqrt(2*pi*Plotas*ro*mu*100)./(Plotas.*Plotas);
RR=8*pi*mu*ilgis./Plotas.^2;
GG=ilgis*(eta-1)*sqrt(2*pi*Plotas*lambda*100/(cp*ro))/(ro*cg*cg);

Rap=128*ro*cg./(9*pi*pi*Plotas(N+1,:));
Lap=8*ro./(3*pi*sqrt(pi*Plotas(N+1,:)));
La=LL/2;
Lb=LL/2;
Ra=RR/2;
Rb=RR/2;
C=CC;
G=GG;
E2=0;
h=1e-5;
t=0:h:200e-3;
```

```

%E=1+sin(2*pi*100*t-pi/2);
%E=ones(size(t))*100;
S=zeros(4*N+2, 20010);
E=100;
S(1:4*N+2,1)=0;
S(2:4:4*N)=E2;
S(4:4:4*N)=E2;

M=ceil(length(t)/1000);
ttt=0:0.001:0.999;
t1=0.4;
t2=0.6;
Ap=4e-6;
KAg=1/(1-cos(pi*t2/t1));
for i=1:1000
    if ttt(i)<t1
        AAg(i)=0.5*Ap*(1-cos(pi*ttt(i)/t1));
    else if ttt(i)<t2
        AAg(i)=Ap*(KAg*cos(pi*(ttt(i)-t1)/t1)-KAg+1);
    else
        AAg(i)=0;
    end
end
end
[ii]=find(AAg<1e-8);
AAg(ii)=1e-8;
Ag=AAg;
for j=1:M-1
    Ag=[Ag AAg];
end

Peri=2*sqrt(pi*Plotas);%Peri=2*sqrt(pi*Plotas);
Rg1=12*mu*dg*lg^2./Ag.^3;
Lg=ro*lg./Ag;
Lw=kwm./(ilgis*Peri);
Cw=ilgis*Peri/kwk;
Rw=kwb./(ilgis*Peri);

for i=1:20000 %t(end)/h-1
    i
    A=zeros(4*N+2);
    Rg(i+1)=Rg1(i)+kg*ro*abs(S(1,i))/(2*Ag(i)^2);
    A(1,1)=1+h*(Rg(i+1)+Ra(1,i+1))/(2*(Lg(i+1)+La(1,i+1)));
    A(1,2)=h/(2*(Lg(i+1)+La(1,i+1)));

    A(2,1)=-h/(2*C(1,i+1));
    A(2,2)=1+h*G(1,i+1)/(2*C(1,i+1));
    A(2,3)=h/(2*C(1,i+1));
    A(2,5)=h/(2*C(1,i+1));

    A(3,2)=-h/(2*Lw(1,i+1));
    A(3,3)=1+h*Rw(1,i+1)/(2*Lw(1,i+1));
    A(3,4)=h/(2*Lw(1,i+1));

    A(4,3)=-h/(2*Cw(1,i+1));
    A(4,4)=1;

```

```

for j=2:N-1
    A(4*j-3, 4*j-6)=-h/(2*(La(j,i+1)+Lb(j-1,i+1)));
    A(4*j-3, 4*j-3)=1+h*(Ra(j,i+1)+Rb(j-1,i+1))/(2*(La(j,i+1)+Lb(j-
1,i+1)));
    A(4*j-3, 4*j-2)=h/(2*(La(j,i+1)+Lb(j-1,i+1)));

    A(4*j-2, 4*j-3)=-h/(2*C(j,i+1));
    A(4*j-2, 4*j-2)=1+h*G(j,i+1)/(2*C(j,i+1));
    A(4*j-2, 4*j-1)=h/(2*C(j,i+1));
    A(4*j-2, 4*j+1)=h/(2*C(j,i+1));

    A(4*j-1, 4*j-2)=-h/(2*Lw(j,i+1));
    A(4*j-1, 4*j-1)=1+h*Rw(j,i+1)/(2*Lw(j,i+1));
    A(4*j-1, 4*j)=h/(2*Lw(j,i+1));

    A(4*j, 4*j-1)=-h/(2*Cw(j,i+1));
    A(4*j, 4*j)=1;
end

A(4*N-3, 4*N-6)=-h/(2*(La(N,i+1)+Lb(N-1,i+1)));
A(4*N-3, 4*N-3)=1+h*(Ra(N,i+1)+Rb(N-1,i+1))/(2*(La(N,i+1)+Lb(N-1,i+1)));
A(4*N-3, 4*N-2)=h/(2*(La(N,i+1)+Lb(N-1,i+1)));

A(4*N-2, 4*N-3)=-h/(2*C(N,i+1));
A(4*N-2, 4*N-2)=1+h*G(N,i+1)/(2*C(N,i+1));
A(4*N-2, 4*N-1)=h/(2*C(N,i+1));
A(4*N-2, 4*N+1)=h/(2*C(N,i+1));

A(4*N-1, 4*N-2)=-h/(2*Lw(N,i+1));
A(4*N-1, 4*N-1)=1+h*Rw(N,i+1)/(2*Lw(N,i+1));
A(4*N-1, 4*N)=h/(2*Lw(N,i+1));

A(4*N, 4*N-1)=-h/(2*Cw(N,i+1));
A(4*N, 4*N)=1;

A(4*N+1, 4*N)=-h/(2*Lb(N,i+1));
A(4*N+1, 4*N+1)=1+h*(Rb(N,i+1)+Rap(i+1))/(2*Lb(N,i+1));
A(4*N+1, 4*N+2)=-h*Rap(i+1)/(2*Lb(N,i+1));
A(4*N+2, 4*N+1)=-h*Rap(i+1)/(2*Lap(i+1));
A(4*N+2, 4*N+2)=1+h*Rap(i+1)/(2*Lap(i+1));

B=zeros(4*N+2,1);
B(1,1)=(Lg(i)+La(1,i))/(Lg(i+1)+La(1,i+1))-
h*(Rg(i)+Ra(1,i))/(2*(Lg(i+1)+La(1,i+1)))*S(1,i)+h/(2*(Lg(i+1)+La(1,i+1)))*
(-S(2,i)+2*E2+2*E);
B(2,1)=h/(2*C(1,i+1))*S(1,i)+(C(1,i)/C(1,i+1)-
h*G(1,i)/(2*C(1,i+1)))*S(2,i)-h/(2*C(1,i+1))*S(3,i)-h/(2*C(1,i+1))*S(5,i);
B(3,1)=h/(2*Lw(1,i+1))*S(2,i)+(Lw(1,i)/Lw(1,i+1)-
h*Rw(1,i)/(2*Lw(1,i+1)))*S(3,i)-h/(2*Lw(1,i+1))*S(4,i);
B(4,1)=h/(2*Cw(1,i+1))*S(3,i)+Cw(1,i)/Cw(1,i+1)*S(4,i);

for j=2:N-1
    B(4*j-3,1)=h/(2*(La(j,i+1)+Lb(j-1,i+1)))*(S(4*j-6,i)-S(4*j-
2,i)+(La(j,i)+Lb(j-1,i)-h*(Ra(j,i)+Rb(j-1,i))/2)/(La(j,i+1)+Lb(j-
1,i+1)))*S(4*j-3,i);
    B(4*j-2,1)=h/(2*C(j,i+1))*(S(4*j-3,i)-S(4*j+1,i)-S(4*j-
1,i)+(C(j,i)/C(j,i+1)-h*G(j,i)/(2*C(j,i+1)))*S(4*j-2,i);

```

```

        B(4*j-1,1)=h/(2*Lw(j,i+1))*S(4*j-2,i)+(Lw(j,i)/Lw(j,i+1)-
h*Rw(j,i)/(2*Lw(j,i+1)))*S(4*j-1,i)-h/(2*Lw(j,i+1))*S(4*j,i);
        B(4*j,1)=h/(2*Cw(j,i+1))*S(4*j-1,i)+Cw(j,i)/Cw(j,i+1)*S(4*j,i);
    end

        B(4*N-3,1)=h/(2*(La(N,i+1)+Lb(N-1,i+1)))*(S(4*N-6,i)-S(4*N-
2,i)+(La(N,i)+Lb(N-1,i)-h*(Ra(N,i)+Rb(N-1,i))/2)/(La(N,i+1)+Lb(N-
1,i+1))*S(4*N-3,i);
        B(4*N-2,1)=h/(2*C(N,i+1))*(S(4*N-3,i)-S(4*N+1,i)-S(4*N-
1,i)+(C(N,i)/C(N,i+1)-h*G(N,i)/(2*C(N,i+1)))*S(4*N-2,i);
        B(4*N-1,1)=h/(2*Lw(N,i+1))*S(4*N-2,i)+(Lw(N,i)/Lw(N,i+1)-
h*Rw(N,i)/(2*Lw(N,i+1)))*S(4*N-1,i)-h/(2*Lw(N,i+1))*S(4*N,i);
        B(4*N,1)=h/(2*Cw(N,i+1))*S(4*N-1,i)+Cw(N,i)/Cw(N,i+1)*S(4*N,i);

        B(4*N+1,1)=h/(2*Lb(N,i))*(S(4*N-2,i)-2*E2)+(1-
h*(Rb(N,i)+Rap(i))/(2*Lb(N,i)))*S(4*N+1,i)+Rap(i)*h/(2*Lb(N,i))*S(4*N+2,i);
        B(4*N+2,1)=h*Rap(i)/(2*Lap(i))*S(4*N+1,i)+(1-
h*Rap(i)/(2*Lap(i)))*S(4*N+2,i);
        S(1:4*N+2,i+1)=A\B;
    end
x=diff(S(end-1,:))'*1e6;
wavplay(x,100000)
wavwrite(x,100000,16,'aa.wav')

```

A trumpam balsiui MatLab modelis:

```

clear all

Plotasx=[0.18 0.33 0.34 0.35 0.44 0.66 1.31 1.91 1.81 1.43];
Plotasx=[Plotasx 1.05 0.74 0.83 1.14 1.29 1.33 1.43 1.51 1.54 1.58];
Plotasx=[Plotasx 1.52 1.35 1.34 1.56 1.74 1.82 1.97 2.35 2.80 3.03];
Plotasx=[Plotasx 3.05 3.01 2.92 2.71 2.34 1.92 1.50 1.19 1.07 1.10];
Plotasx=[Plotasx 1.19 1.25 1.16 0.98];
Plotas2=Plotasx*1e-4;
ilgis=0.004
N=length(Plotas2);
for j=1:200
    Plotas1(:,j)=Plotas2';
end
Plotas=Plotas1;
for j=1:100
    Plotas=[Plotas Plotas1];
end

Plotas(N+1,:)=Plotas(end,:);

ro=1.29;
cg=3.3145e2;
mu=1.99e-5;
eta=1.4;
lambda=23.03e-3;
cp=1005;

```

```

lg=1.4e-2;
dg=0.3e-2;
kg=1.4;

kwm=15;
kwb=1.4e4;
kwk=3e6;

LL=ro*ilgis./Plotas;
CC=Plotas*ilgis/ro/(cg*cg);
%RR=ilgis*sqrt(2*pi*Plotas*ro*mu*100)./(Plotas.*Plotas);
RR=8*pi*mu*ilgis./Plotas.^2;
GG=ilgis*(eta-1)*sqrt(2*pi*Plotas*lambda*100/(cp*ro))/(ro*cg*cg);

Rap=128*ro*cg./(9*pi*pi*Plotas(N+1,:));
Lap=8*ro./(3*pi*sqrt(pi*Plotas(N+1,:)));
La=LL/2;
Lb=LL/2;
Ra=RR/2;
Rb=RR/2;
C=CC;
G=GG;
E2=0;
h=1e-5;
t=0:h:200e-3;
%E=1+sin(2*pi*100*t-pi/2);
%E=ones(size(t))*100;
S=zeros(4*N+2,20010);
E=100;
S(1:4*N+2,1)=0;
S(2:4:4*N)=E2;
S(4:4:4*N)=E2;

M=ceil(length(t)/1000);
ttt=0:0.001:0.999;
t1=0.4;
t2=0.6;
Ap=4e-6;
KAg=1/(1-cos(pi*t2/t1));
for i=1:1000
    if ttt(i)<t1
        AAg(i)=0.5*Ap*(1-cos(pi*ttt(i)/t1));
    else if ttt(i)<t2
        AAg(i)=Ap*(KAg*cos(pi*(ttt(i)-t1)/t1)-KAg+1);
    else
        AAg(i)=0;
    end
end
end
[ii]=find(AAg<1e-8);
AAg(ii)=1e-8;
Ag=AAg;
for j=1:M-1
    Ag=[Ag AAg];
end

Peri=2*sqrt(pi*Plotas);%Peri=2*sqrt(pi*Plotas);

```

```

Rg1=12*mu*dg*lg^2./Ag.^3;
Lg=ro*lg./Ag;
Lw=kwm./(ilgis*Peri);
Cw=ilgis*Peri/kwk;
Rw=kwb./(ilgis*Peri);

for i=1:20000 %t(end)/h-1
    i
    A=zeros(4*N+2);
    Rg(i+1)=Rg1(i)+kg*ro*abs(S(1,i))/(2*Ag(i)^2);
    A(1,1)=1+h*(Rg(i+1)+Ra(1,i+1))/(2*(Lg(i+1)+La(1,i+1)));
    A(1,2)=h/(2*(Lg(i+1)+La(1,i+1)));

    A(2,1)=-h/(2*C(1,i+1));
    A(2,2)=1+h*G(1,i+1)/(2*C(1,i+1));
    A(2,3)=h/(2*C(1,i+1));
    A(2,5)=h/(2*C(1,i+1));

    A(3,2)=-h/(2*Lw(1,i+1));
    A(3,3)=1+h*Rw(1,i+1)/(2*Lw(1,i+1));
    A(3,4)=h/(2*Lw(1,i+1));

    A(4,3)=-h/(2*Cw(1,i+1));
    A(4,4)=1;

    for j=2:N-1
        A(4*j-3, 4*j-6)=-h/(2*(La(j,i+1)+Lb(j-1,i+1)));
        A(4*j-3, 4*j-3)=1+h*(Ra(j,i+1)+Rb(j-1,i+1))/(2*(La(j,i+1)+Lb(j-1,i+1)));
        A(4*j-3, 4*j-2)=h/(2*(La(j,i+1)+Lb(j-1,i+1)));

        A(4*j-2, 4*j-3)=-h/(2*C(j,i+1));
        A(4*j-2, 4*j-2)=1+h*G(j,i+1)/(2*C(j,i+1));
        A(4*j-2, 4*j-1)=h/(2*C(j,i+1));
        A(4*j-2, 4*j+1)=h/(2*C(j,i+1));

        A(4*j-1, 4*j-2)=-h/(2*Lw(j,i+1));
        A(4*j-1, 4*j-1)=1+h*Rw(j,i+1)/(2*Lw(j,i+1));
        A(4*j-1, 4*j)=h/(2*Lw(j,i+1));

        A(4*j, 4*j-1)=-h/(2*Cw(j,i+1));
        A(4*j, 4*j)=1;
    end

    A(4*N-3, 4*N-6)=-h/(2*(La(N,i+1)+Lb(N-1,i+1)));
    A(4*N-3, 4*N-3)=1+h*(Ra(N,i+1)+Rb(N-1,i+1))/(2*(La(N,i+1)+Lb(N-1,i+1)));
    A(4*N-3, 4*N-2)=h/(2*(La(N,i+1)+Lb(N-1,i+1)));

    A(4*N-2, 4*N-3)=-h/(2*C(N,i+1));
    A(4*N-2, 4*N-2)=1+h*G(N,i+1)/(2*C(N,i+1));
    A(4*N-2, 4*N-1)=h/(2*C(N,i+1));
    A(4*N-2, 4*N+1)=h/(2*C(N,i+1));

    A(4*N-1, 4*N-2)=-h/(2*Lw(N,i+1));
    A(4*N-1, 4*N-1)=1+h*Rw(N,i+1)/(2*Lw(N,i+1));
    A(4*N-1, 4*N)=h/(2*Lw(N,i+1));

```



```

A(4*N, 4*N-1)=-h/(2*Cw(N,i+1));
A(4*N, 4*N)=1;

A(4*N+1,4*N)=-h/(2*Lb(N,i+1));
A(4*N+1,4*N+1)=1+h*(Rb(N,i+1)+Rap(i+1))/(2*Lb(N,i+1));
A(4*N+1,4*N+2)=-h*Rap(i+1)/(2*Lb(N,i+1));
A(4*N+2,4*N+1)=-h*Rap(i+1)/(2*Lap(i+1));
A(4*N+2,4*N+2)=1+h*Rap(i+1)/(2*Lap(i+1));

B=zeros(4*N+2,1);
B(1,1)=(Lg(i)+La(1,i))/(Lg(i+1)+La(1,i+1))-
h*(Rg(i)+Ra(1,i))/(2*(Lg(i+1)+La(1,i+1)))*S(1,i)+h/(2*(Lg(i+1)+La(1,i+1)))*
(-S(2,i)+2*E2+2*E);
B(2,1)=h/(2*C(1,i+1))*S(1,i)+(C(1,i)/C(1,i+1)-
h*G(1,i)/(2*C(1,i+1)))*S(2,i)-h/(2*C(1,i+1))*S(3,i)-h/(2*C(1,i+1))*S(5,i);
B(3,1)=h/(2*Lw(1,i+1))*S(2,i)+(Lw(1,i)/Lw(1,i+1)-
h*Rw(1,i)/(2*Lw(1,i+1)))*S(3,i)-h/(2*Lw(1,i+1))*S(4,i);
B(4,1)=h/(2*Cw(1,i+1))*S(3,i)+Cw(1,i)/Cw(1,i+1)*S(4,i);

for j=2:N-1
    B(4*j-3,1)=h/(2*(La(j,i+1)+Lb(j-1,i+1)))*(S(4*j-6,i)-S(4*j-
2,i)+(La(j,i)+Lb(j-1,i)-h*(Ra(j,i)+Rb(j-1,i))/2)/(La(j,i+1)+Lb(j-
1,i+1)))*S(4*j-3,i);
    B(4*j-2,1)=h/(2*C(j,i+1))*(S(4*j-3,i)-S(4*j+1,i)-S(4*j-
1,i)+(C(j,i)/C(j,i+1)-h*G(j,i)/(2*C(j,i+1)))*S(4*j-2,i);
    B(4*j-1,1)=h/(2*Lw(j,i+1))*S(4*j-2,i)+(Lw(j,i)/Lw(j,i+1)-
h*Rw(j,i)/(2*Lw(j,i+1)))*S(4*j-1,i)-h/(2*Lw(j,i+1))*S(4*j,i);
    B(4*j,1)=h/(2*Cw(j,i+1))*S(4*j-1,i)+Cw(j,i)/Cw(j,i+1)*S(4*j,i);
end

B(4*N-3,1)=h/(2*(La(N,i+1)+Lb(N-1,i+1)))*(S(4*N-6,i)-S(4*N-
2,i)+(La(N,i)+Lb(N-1,i)-h*(Ra(N,i)+Rb(N-1,i))/2)/(La(N,i+1)+Lb(N-
1,i+1)))*S(4*N-3,i);
B(4*N-2,1)=h/(2*C(N,i+1))*(S(4*N-3,i)-S(4*N+1,i)-S(4*N-
1,i)+(C(N,i)/C(N,i+1)-h*G(N,i)/(2*C(N,i+1)))*S(4*N-2,i);
B(4*N-1,1)=h/(2*Lw(N,i+1))*S(4*N-2,i)+(Lw(N,i)/Lw(N,i+1)-
h*Rw(N,i)/(2*Lw(N,i+1)))*S(4*N-1,i)-h/(2*Lw(N,i+1))*S(4*N,i);
B(4*N,1)=h/(2*Cw(N,i+1))*S(4*N-1,i)+Cw(N,i)/Cw(N,i+1)*S(4*N,i);

B(4*N+1,1)=h/(2*Lb(N,i))*(S(4*N-2,i)-2*E2)+(1-
h*(Rb(N,i)+Rap(i))/(2*Lb(N,i)))*S(4*N+1,i)+Rap(i)*h/(2*Lb(N,i))*S(4*N+2,i);
B(4*N+2,1)=h*Rap(i)/(2*Lap(i))*S(4*N+1,i)+(1-
h*Rap(i)/(2*Lap(i)))*S(4*N+2,i);
S(1:4*N+2,i+1)=A\B;
end
x=diff(S(end-1,:))' *1e6;
wavplay(x, 100000)
wavwrite(x, 100000, 16, 'a.wav')

```

E trumpo balsio MatLab modelis:

-----„-----

```
Plotas3=[0.34 0.45 0.46 0.36 0.4 0.96 1.87 2.33 2.09 1.66];
Plotas3=[Plotas3 1.5 1.61 1.76 2.04 2.52 2.83 2.85 2.7 2.5 2.19];
Plotas3=[Plotas3 1.74 1.42 1.36 1.26 0.97 0.7 0.55 0.52 0.65 0.86];
Plotas3=[Plotas3 1.07 1.29 1.44 1.47 1.51 1.61 1.64 1.54 1.46 1.52];
Plotas3=[Plotas3 1.63 1.64 1.55 1.44];
Plotas2=Plotas3*1e-4;
ilgis=0.00409
```

-----„-----

E ilgo balsio Matlab modelis:

-----„-----

```
Plotas5=[0.75 0.64 0.52 0.45 0.55 1.18 1.97 2.1 1.79 1.53];
Plotas5=[Plotas5 1.5 1.78 2.2 2.56 2.78 2.85 2.85 2.78 2.52 2.09];
Plotas5=[Plotas5 1.69 1.52 1.45 1.27 0.99 0.81 0.75 0.81 1.03 1.3];
Plotas5=[Plotas5 1.5 1.72 1.91 1.97 1.95 1.9 1.8 1.7 1.65 1.72];
Plotas5=[Plotas5 1.82 1.83 1.72 1.5];
Plotas2=Plotas5*1e-4;
```

-----„-----