

Wanda Nowakowska

MODEL SYMULACYJNY
TORU GŁOSOWEGO
GARDŁOWO-USTNEGO

41/1983

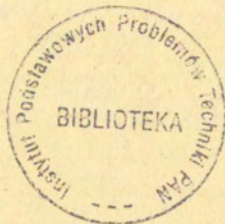
P. 269



WARSZAWA 1983

<http://rcin.org.pl>

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 24 października 1983 r.



56996



N a p r a w a c h r ę k o p i s u

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 130 egz. Ark.wyd. 3. Ark.druk. 4,75 .
Ođdano do drukarni w listopadzie 1983.
Nr zamówienia 791/83

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul.Śniadeckich 8

MODEL SYMULACYJNY TORU GŁOSOWEGO
GARDŁOWO - USTNEGO

1. Wstęp

Przedmiotem i zarazem celem pracy jest symulacyjny model komputerowy toru głosowego organu mowy, ograniczonego do jego strefy gardłowo-ustnej. Zgodnie z założeniami, model ten powinien odtwarzać warunki artykulacji nienazalizowanych dźwięków mowy o pobudzeniu krtaniowym typu *r e z o n a n t*, przede wszystkim samogłosek ustnych, z uwzględnieniem różnicowań osobniczych, wynikających z indywidualnych cech anatomicznych organu mowy zarówno w stanach fizjologicznie normalnych, jak i patologicznych.

Symulacja komputerowa jest obecnie nowoczesną, powszechnie stosowaną techniką modelowania wielu różnych systemów i procesów. O jej zastosowaniach zdecydował między innymi fakt, iż często jest jedyną możliwą metodą analizy i oceny działania układu rzeczywistego. Próby pomiaru *in situ* parametrów, związanych z pracą niektórych skomplikowanych systemów i układów, prowadzą zazwyczaj do zakłóceń w działaniu badanego obiektu i wówczas konwencjonalne metody analityczne i pomiarowe okazują się mało skuteczne, trudne, a niekiedy wręcz niemożliwe. Dotyczy to zwłaszcza układów biologicznych. Modelowanie symulacyjne organu mowy oraz jego funkcji głosotwórczych i artykulacyjnych jest tylko szczególnym przypadkiem metod analizy i oceny biologicznych układów rzeczywistych poprzez badanie zachowania się ich modeli.

Symulacyjne modelowanie toru głosowego, traktowanego jako

akustyczny układ transmisyjny zasilany ze źródła krztaniowego i zakończony otworem wylotowym ust, a w niektórych przypadkach połączony ponadto z kanałem nosowym, jest obecnie przedmiotem badań wielu różnych ośrodków naukowych na świecie. Zainteresowanie tym problemem uzasadnione jest szerokim i wielostronnym zakresem jego zastosowań. Badania są prowadzone na różnych płaszczyznach i do różnych celów, bądź jako prace o charakterze poznawczym, zmierzające do wyjaśnienia wielu nieznanych jeszcze dostatecznie zjawisk z zakresu akustyki mowy i fonetyki akustycznej, bądź jako ukierunkowane badania podstawowe o zastosowaniach technicznych, związanych z analizą i automatycznym rozpoznawaniem mowy w oparciu o artykulacyjną klasyfikację głosek (fonemów), oraz z konfiguracyjną syntezą mowy. Inną ważną dziedziną zastosowań badań modelowych organu mowy jest rozwijanie obiektywnych metod akustycznych diagnostyki i rehabilitacji medycznej w laryngologii i foniatryi, a także wspomaganie procesów dydaktycznych w nauce poprawnej wymowy (lingwistyka stosowana, logopedia) oraz śpiewu (wokalistyka).

Mówiąc najogólniej, modelowanie toru głosowego sprowadza się do odwzorowania w układach fizycznych jego struktury anatomicznej, a zwłaszcza konfiguracji geometrycznej, w warunkach artykulacji fonetycznie zdefiniowanych dźwięków mowy, z możliwością uwzględnienia różnych wariantów indywidualnych, określonych cechami osobniczymi głosu mówcy. Punktem wyjścia przy tworzeniu symulacyjnego modelu toru głosowego jest zatem przedstawienie go w postaci odpowiedniego zestawu elementarnych układów fizycznych, zazwyczaj akustycznych lub elektrycznych, których właściwości i charakterystyki są a priori znane lub dają się opisać zależnościami matematycznymi, w oparciu o wybrany system analogii elektro-akustycznych.

Celem tego wstępnego etapu jest opracowanie analogowego modelu toru głosowego, który następnie zostanie poddany procesowi symulacji komputerowej.

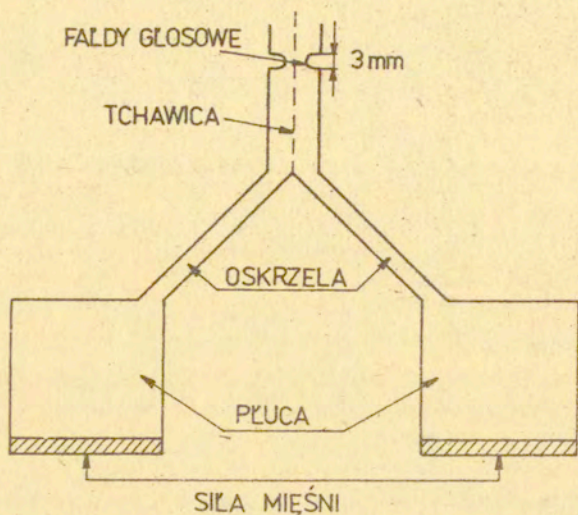
2. Model funkcjonalny organu mowy przy artykulacji głosek dźwięcznych o pobudzeniu krtaniowym.

Budowa anatomiczna organu mowy jest bardzo złożona zarówno pod względem strukturalnym, jak i czynnościowym, a jej szczegółowe opisy można znaleźć w licznych opracowaniach medycznych, zwłaszcza o charakterze podręcznikowym, [patrz np. WIERZCHOWSKA (1980)]. Do celów akustycznego modelowania organu mowy opis ten można jednak znacznie uprościć, ograniczając go do omówienia roli tylko tych członów układu biologicznego, które są istotne z punktu widzenia pełnionych przez nie funkcji głosotwórczych i artykulacyjnych, tj. układów: fonacyjnego, respiracyjnego i artykulacyjnego sensu stricto.

2.1. Układ fonacyjny. Funkcje głosotwórcze przy wymawianiu głosek dźwięcznych o charakterze akustycznych przebiegów quasi-periodycznych pełni układ fonacyjny w postaci krtani, której integralną częścią jest głośnia, utworzona przez fałdy głosowe (władzia). Źródło krtaniowe jest - z fizycznego punktu widzenia - oscylatorem aerodynamicznym, którego drgania są determinowaną funkcją szeregu parametrów fizycznych, przede wszystkim ciśnienia podgłośniowego oraz stałych mechano-akustycznych i strukturalnych właściwości fałdów głosowych, a jednocześnie zależą w pewnym stopniu od jego obciążenia akustyczną impedancją wejściową części nadgłośniowej organu mowy, tj. toru głosowego, w ogólnym przypadku gardłowo-ustno-nosowego.

2.2. Układ respiracyjny. Działania źródła krtaniowego nie można rozpatrywać w oderwaniu od podgłośniowej części układu respiracyjnego organu mowy, przedstawionego na rys.1 w postaci uproszczonego modelu fizycznego. Fałdy głosowe o określonej masie, sprężystości i rezystancji strat są wprawiane w drgania wymuszone przez lokalne zmiany ciśnienia w głośni, wywołane przepływem powietrza, wypychanego z płuc przez kanały oskrzeli i tchawicę pod wpływem nacisku mięśni klatki piersiowej na zbiorniki płuc. Quasi-periodyczne drgania fałdów głosowych powodują zmiany powierzchni, a więc i akustycznej impedancji otworu głośni, modulując tym samym strumień przepływającego przez niego osrodka, który przybiera postać ciągu dyskretnych

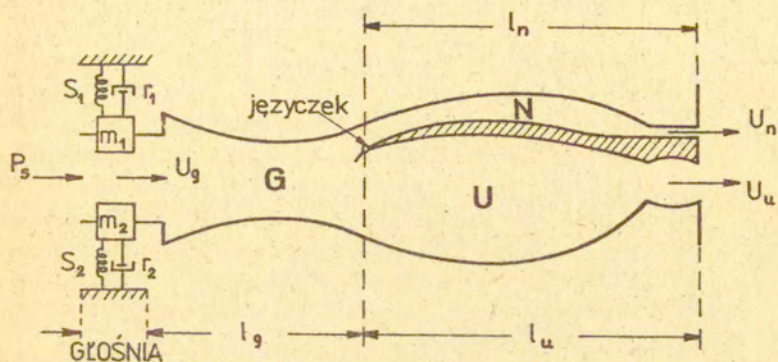
impulsów, pełniącego rolę impulsowej funkcji źródła, wzbudzającej w torze głosowym drgania powietrza o częstotliwościach, odpowiadających rezonansom własnym toru i zależnych od jego chwilowej konfiguracji geometrycznej.



Rys.1. Uproszczony model fizyczny podgłośniowej części układu oddechowego.

2.3. Układ artykulacyjny. Na rys.2 przedstawiono uproszczony model akustyczny ponadkrtaniowej części organu mowy, pełniący rolę właściwego układu artykulacyjnego. Tor głosowy gardłowo-ustny (G+U) ma postać rury o nieregularnym przekroju poprzecznym, określonym funkcją powierzchni $A(x)$, gdzie x jest odległością od otworu głośnia. W normalnych warunkach anatomicznych dorosłego mężczyzny długość toru głosowego $l_{gu} = l_g + l_u$, zakończony otworem wylotowym ust w punkcie $x = l_{gu}$, jest rzędu $16 \div 19$ cm, a jego powierzchni przekroju przybiera wartości od części cm^2 do około $15 cm^2$. W obszarze nosogardła (med.: nasopharynx) do toru gardłowo-ustnego może być - w przypadku nazalizacji - dołączony kanał nosowy N w postaci nieregularnej rury o długości $l_n \approx 12$ cm i objętości około $50 cm^3$. Rolę zaworu, kontrolującego stopień akustycznego

sprężenia kanału nosowego z ustnym, a więc tym samym stopień nazalizacji pierwotnie nienosowych dźwięków mowy, pełni ruchomy koniec podniebienia miękkiego, tzw. języczek tylny (med.: velum).



Rys.2. Uproszczony model akustyczny ponadkrtaniowej części organu mowy.

Znaczna część powierzchni ścian toru gardłowo-ustnego tworzą ruchome efekторы artykulacyjne organu mowy, tj. wargi, język, podniebienie miękkie oraz żuchwa. Z tego względu konfiguracja geometryczna, tj. kształt, długość i objętość toru gardłowo-ustnego, podczas procesu artykulacji podlega znacznym i ciągłym zmianom, w odróżnieniu od toru nosowego, którego struktura i konfiguracja geometryczna jest stała, nie zależy od warunków artykulacji i wykazuje jedynie zróżnicowania osobnicze.

Energia akustyczna fali głosowej, emitowanej przez organ mowy, wydziela się na impedancji promieniowania otworu ust i ewentualnie, w przypadku nazalizacji, na impedancji promieniowania otworów nosa. Zgodnie z założeniami, dalsze rozważania w ramach obecnej pracy dotyczyć będą wyłącznie modelowania toru gardłowo-ustnego, z pominięciem efektu nazalizacji, wywołanej bocznikującym wpływem kanału nosowego.

3. Akustyczne modelowanie toru głosowego

3.1. Tor głosowy jako akustyczny układ transmisyjny.

Zagadnieniem podstawowym przy modelowaniu czynności głosotwórczych i artykulacyjnych organu mowy jest wyznaczenie postaci funkcji transmitancji $T(f)$ toru głosowego, wyrażonej stosunkiem prędkości objętościowych lub ciśnień akustycznych występujących odpowiednio w otworze wylotowym ust i w otworze głośni. Najbardziej ogólne analityczne rozwiązania tego zagadnienia polega na potraktowaniu toru głosowego jako akustyczny układ transmisyjny w postaci bezstratnej rury o nieregularnym przekroju poprzecznym, opisanym ciągłą funkcją powierzchni $A(x)$ i zastosowaniu do takiego modelu równania falowego, zwanego w literaturze równaniem Webstera [WEBSTER (1919)] .

$$(1) \quad \frac{1}{A(x)} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left[A(x) \frac{\partial p}{\partial x} \right] = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

gdzie: $A(x)$ - powierzchnia przekroju poprzecznego rury jako funkcja odległości x od otworu głośni;

$p(x,t)$ - ciśnienie akustyczne fali głosowej w rurze jako funkcja czasu t i odległości x ;

c - prędkość rozchodzenia się fali głosowej w powietrzu.

Równanie falowe (1) w zastosowaniu do toru głosowego jest słuszne przy pominięciu występujących strat i spełnieniu założeń ograniczających, które dotyczą m.in. postaci funkcji $A(x)$ oraz zakresu częstotliwości ($f < f_{\max} \approx 4000$ Hz) i warunkują rozchodzenie się w rurze jednokierunkowej fali płaskiej.

Falowa metoda rozpatrywania zjawisk akustycznych, zachodzących w torze głosowym podczas procesu artykulacji, okazała się zbyt skomplikowana analitycznie i poza nielicznymi przypadkami, dotyczącymi artykulacji samogłoskowej [patrz np. CHIBA i KAJIYAMA (1941)] oraz opartymi na rozwiązaniach numerycznych równania (1) [HEINZ (1962); UNGEHEUER (1962)], nie znalazła zastosowań praktycznych do celów modelowania.

3.2. Tor głosowy jako układ akustyczny o stałych skupionych.

Najbardziej uproszczonym modelem toru głosowego jest układ akustyczny o stałych skupionych, którego maksymalny wymiar jest znacznie mniejszy od długości fali głosowej λ , co w rozpatrywanym tu przypadku jest spełnione w ograniczonym od góry zakresie częstotliwości $f < 1000$ Hz. W najprostszym przypadku modelem takim może być np. klasyczny rezonator Helmholtza, który jednak, jako układ jednorezonansowy, odtwarza strukturę widmową samogłoski tylko w zakresie jednego, z reguły pierwszego albo drugiego formantu, tj. F1 lub F2, co nie wystarcza do jej identyfikacji fonetycznej [CRANDALL (1927)].

Bardziej realistycznym rozwiązaniem jest model dwurezonansowy, złożony z dwóch sprzężonych ze sobą rezonatorów Helmholtza, słuszny w szczególnym przypadku tych samogłosek, przy artykulacji których tor głosowy jest wyraźnie podzielony na dwie wnęki: przednią, zakończoną otworem wylotowym ust, i tylną, sprzężoną z pierwszą za pośrednictwem przewężenia między uniesionym grzbietem języka i podniebieniem [patrz np. FANT (1960); KĄCPROWSKI (1962)].

Ogólnie biorąc jednak, przedstawienie toru głosowego w postaci kilku sprzężonych układów rezonansowych o stałych skupionych okazało się zbyt prymitywne do celów modelowania jego struktury akustycznej w rzeczywistych warunkach artykulacji. Wynika to, między innymi, z oczywistego faktu, iż utożsamianie struktury widmowo-formantowej poszczególnych głosek z częstotliwościami rezonansowymi określonych i wyodrębnionych stref toru głosowego jest sztuczne i nieuzasadnione zarówno z akustycznego, jak i artykulacyjnego punktu widzenia. Inną istotną wadą wspomnianych wyżej modeli rezonansowych, ograniczającą ich zakres zastosowań, były trudności techniczne, związane z ich przestrajaniem, które wymagało zmiany parametrów akustycznych: objętości wnęki rezonatora (tj. podatności akustycznej C_a) i rozmiarów szyjki (tj. masy akustycznej M_a), określających częstotliwość rezonansową układu $F_0 = (2\pi \sqrt{C_a M_a})^{-1}$.

Znacznie dogodniejsze i umożliwiające odtwarzanie konfiguracji geometrycznej toru głosowego w warunkach artykulacji zbliżonych do rzeczywistych okazały się modele akustyczne w

postaci łańcuchowego połączenia kilku, w praktyce nie więcej niż czterech, odcinków jednorodnych rur cylindrycznych o różnych długościach i różnych przekrojach poprzecznych z założenia traktowanych jako układy akustyczne o stałych skupionych. Warunek ten jednoznacznie określa maksymalne wartości stosunku wzdłużnych i poprzecznych rozmiarów rur d_{\max} do najkrótszej fali głosowej λ_{\min} : $d_{\max} / \lambda_{\min} \leq 0.25$, co z kolei ogranicza od góry zakres częstotliwości, w którym model ten jest poprawny: $f \leq f_{\max} = \frac{c}{4d_{\max}}$, gdzie c jest prędkością dźwięku w powietrzu.

Szczególnie przydatne do celów badawczych były modele złożone z czterech segmentów cylindrycznych, które imitują odpowiednio wnękę tylną (gardłową) toru głosowego, przewężenie między językiem i podniebieniem, wnękę przednią (ustną) oraz otwór wylotowy ust, utworzony przez odpowiednie ukształtowanie warg, określające stopień labializacji. Taka struktura modelu odpowiada w przybliżeniu artykulacji samogłoskowej i była stosowana do artykulacyjnego opisu samogłosek, wyrażonego w terminach parametrów geometrycznych toru głosowego [DUNN (1950); STEVENS i HOUSE (1955); FANT (1960); COKER (1968)] .

Rozwój metod akustycznego modelowania organu mowy, obserwowany w latach 50-tych i 60-tych, zmierzał głównie w dwóch kierunkach: (a) zwiększenia dokładności odwzorowania struktury akustycznej i konfiguracji artykulacyjnej toru głosowego oraz (b) podwyższenia górnej częstotliwości granicznej zakresu stosowalności modeli. Oba te cele można osiągnąć jednocześnie, zwiększając liczbę n elementarnych segmentów cylindrycznych, na jakie został umownie podzielony tor głosowy w wyniku jego segmentacji przestrzennej, a zmniejszając odpowiednio ich długość l . W miarę wzrostu n i skracania l model analogowy toru głosowego przybiera cechy akustycznego układu transmisyjnego o parametrach jednostkowych rozłożonych w przestrzeni w sposób ciągły, którego analogiem elektrycznym jest linia długa, znana dobrze z teorii teletransmisji.

3.3. Modele konfiguracyjne toru głosowego.

Koncepcja przedstawienia toru głosowego o długości L w postaci łańcuchowego połączenia n elementarnych segmentów cylindrycznych o jednakowych długościach $l = L/n = \text{const.}$, lecz w ogólnym przypadku o różnych przekrojach poprzecznych A_i , gdzie $i = 1, 2, 3, \dots, n$, leży u podstaw najczęściej obecnie stosowanych, zwłaszcza do celów symulacji komputerowej, analogowych modeli konfiguracyjnych toru głosowego o akustycznych parametrach jednostkowych rozłożonych w przestrzeni w sposób quasi-ciągły. Ogólna zasada tej metody modelowania analogowego, rozwiniętej w latach 50-tych, jest aktualna do chwili obecnej i polega na przedstawieniu elementarnego segmentu rury cylindrycznej o długości l i przekroju poprzecznym A , traktowanego jako układ o stałych skupionych, w postaci elektrycznego układu zastępczego, na przykład czwórnika typu T lub Π o parametrach jednostkowych L, C, R, G równoważnych jednostkowym parametrem akustycznym rury, to jest masie akustycznej M_a , podatności akustycznej C_a , rezystancji strat tarciovych R_a i konduktancji strat cieplnych G_a . Akustyczna impedancja źródła krtaniowego Z_g oraz akustyczna impedancja promieniowania otworu ust Z_o i ewentualnie nosa Z_n są także zastąpione równoważnymi dwójnikami elektrycznymi. Zasada twierzenia elektrycznych układów zastępczych jest oparta na dowolnie wybranym systemie analogii elektro-akustycznych.

Pierwszym zbudowanym na tej zasadzie elektrycznym modelem analogowym toru głosowego był układ, utworzony z konkatenacji 25 czwórników typu T, z których każdy reprezentował segment toru o długości $l = 0.5 \text{ cm}$ [DUNN (1950)]. Autorami kolejnych, wciąż udoskonalanych i dziś już klasycznych wersji analogowych modeli konfiguracyjnych, złożonych zazwyczaj z 20 - 30 sekcji i przeznaczonych głównie do celów syntezy mowy, byli STEVENS, KASOWSKI i FANT (1953) oraz FANT (1960). STEVENS i HOUSE (1955) rozbudowali model artykulacyjny toru głosowego przez dołączenie doń źródła krtaniowego, a van den BERG (1960) opracował analogowy model podgłośniowego układu respiracyjnego, współpracującego z torem głosowym.

Zmiana wartości parametrów LCRG poszczególnych ozwórników kształtujących konfigurację artykulacyjną modelu, dokonywana była początkowo ręcznie, a następnie na drodze elektrycznej, za pomocą odpowiednio zaprogramowanych napięciowych sygnałów sterujących, patrz np. ROSEN (1958); HECKER (1962). Sterowanie analogowego modelu konfiguracyjnego sygnałami cyfrowymi, wypracowanymi z komputera, zastosował po raz pierwszy DENNIS (1962), patrz także GUERIN (1974).

Obecnie, wobec rozwoju wielostrewnych zastosowań elektro-nicznej techniki obliczeniowej, analogowe modele toru głosowego, konstruowane dawniej jako układy fizyczne, początkowo akustyczne, a potem elektryczne, straciły swoje pierwotne znaczenie i są z reguły zastępowane modelami cyfrowymi, realizowanymi metodą symulacji komputerowej. Istota procesu symulacji komputerowej polega - mówiąc najogólniej - na stworzeniu matematycznego opisu struktury fizycznej przyjętego modelu analogowego toru głosowego w ściśle zdefiniowanych warunkach artykulacji i wyznaczaniu wartości wybranych parametrów fonetyczno-akustycznych produktu artykulacji, tj. sygnału mowy, w określonych przekrojach toru głosowego i określonych momentach czasu w postaci cyfrowej, w wyniku obliczeń numerycznych, zgodnie z opracowanymi programami na EMC.

Istotną cechą modeli symulacyjnych, decydującą o ich przewadze nad modelami analogowymi, jest znacznie większa dokładność odtwarzania rzeczywistych, fizjopatologicznych warunków artykulacji, możliwość uwzględniania strat energetycznych w torze głosowym, impedancji promieniowania ust oraz impedancji źródła krtaniowego, a także wzajemnego oddziaływania systemów nad- i podgłośniowego [FLANAGAN i LANDGRAF (1968)], co jest trudne do zrealizowania w modelach analogowych. Ponadto zakres zmian wartości parametrów w modelu cyfrowym jest nieporównywalnie większy niż w modelu analogowym, przy czym każda zmiana założeń lub struktury toru głosowego wprowadzana jest do modelu cyfrowego w postaci zmiany wartości liczbowych opisujących go parametrów, podczas gdy w przypadku modelu analogowego wymaga to jego przekonstruowania.

Według dostępnych informacji pierwszy symulacyjny model toru głosowego opracowali KELLY i LOEBBAUM (1962). Od tego czasu

powstało kilka nowych opracowań modeli symulacyjnych, w wyniku badań prowadzonych w różnych ośrodkach naukowych, głównie we Francji, Szwecji i USA, patrz np. MRAYATI i GUERIN (1976); FLANAGAN, ISHIZAKA i SHIPLEY (1975); MAEDA (1982). WAKITA i FANT (1978) podsumowali aktualny stan badań nad symulacją komputerową toru głosowego, wytyczając jednocześnie przewidywane kierunki ich rozwoju. Niniejsza praca jest pierwszą w Polsce próbą stworzenia modelu symulacyjnego toru głosowego i jego weryfikacji na materiale fonetycznym języka polskiego, w nawiązaniu do opracowanego poprzednio artykulacyjnego modelu analogowego [KACPROWSKI (1977b), (1981)] .

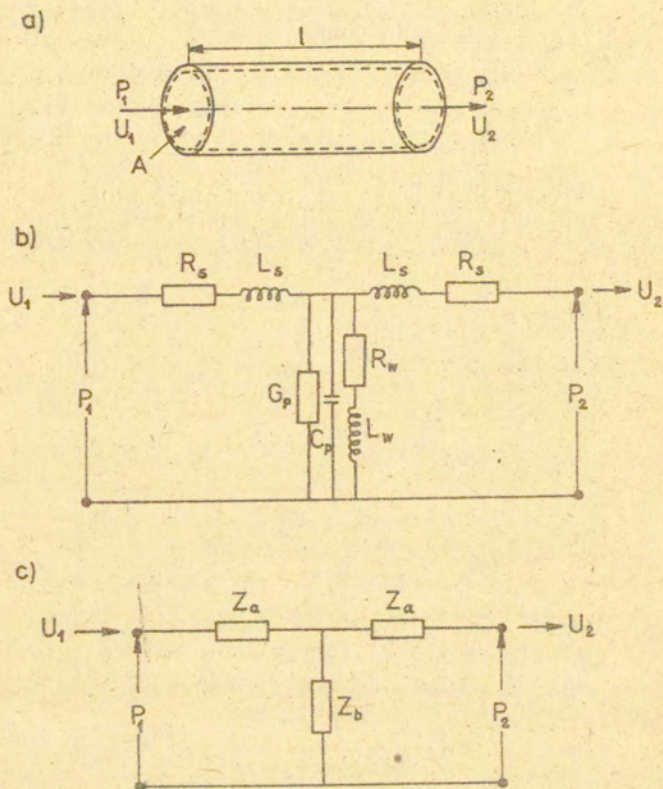
4. Założenia teoretyczne i realizacja akustycznego modelu konfiguracyjnego

4.1. Akustyczna struktura modelu i jej odwzorowania w układzie zastępczym.

Przyjmując za punkt wyjścia obecny stan wiedzy w dziedzinie akustycznego modelowania mowy, z uwzględnieniem dotychczasowych doświadczeń Zakładu Akustyki Cybernetycznej IPPT PAN w tym zakresie [KACPROWSKI (1977a), (1981)] , a jednocześnie biorąc pod uwagę ograniczone możliwości techniczne (moc obliczeniową, dokładność obliczeń, szybkość działania) pozostającej do dyspozycji EMC, przewidzianej do symulacji komputerowej modelu (minikomputer MERA-300), opracowano kolejną wersję artykulacyjnego modelu toru głosowego o następujących założeniach strukturalnych.

Tor gardłowo-ustny przedstawiony jest w postaci łańcuchowego połączenia $n = 17$ segmentów elementarnych w postaci rur cylindrycznych, z których każdy reprezentuje odcinek toru o długości 1 cm. Przewidziano możliwość zwiększania liczby segmentów do 19 w tych warunkach artykulacji, kiedy ukształtowanie warg stanowi naturalne przedłużenie toru, jak to ma miejsce np. w przypadku samogłoski [u]. Dokładność aproksymacji jest tym większa, im mniejsza jest długość elementarnego segmentu. Zastosowana długość segmentu $l = 1$ cm spełnia warunek graniczny $l \leq \frac{1}{4} \lambda_{\min}$ w zakresie częstotliwości do 5000 Hz,

co pozwala na traktowanie elementarnego odcinka toru jako układu o stałych skupionych. Na rys.3 przedstawiono elementarny segment w postaci rury cylindrycznej o długości l i powierzchni A oraz jego czwórnikowe schematy zastępcze.



Rys.3. Rura cylindryczna o długości l i przekroju poprzecznym A , reprezentująca elementarny segment toru głosowego (a) oraz jej czwórnikowe schematy zastępcze (b) i (c).
 P - ciśnienie akustyczne, U - prędkość objętościowa.

Przyjęcie kołowego przekroju poprzecznego segmentu jest założeniem upraszczającym, które znacznie ułatwia procedury obliczeniowe, a nie ma istotnego wpływu na efekt obliczeń, co zostało sprawdzone dla segmentów o przekroju eliptycznym [WAKITA

i FANT (1978)] . Układem zastępczym jednorodnej rury cylindrycznej o długości l i przekroju A (rys.3a) może być np. symetryczny czwórnik typu T (rys.3b), którego parametry akustyczne L_s , R_s , C_p , G_p , R_w i L_w są następująco określone:

$$(2) \quad L_s = \frac{\rho \cdot l}{2A}$$

- masa akustyczna powietrza w rurze $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-4}]$,

$$(3) \quad C_p = \frac{A \cdot l}{\rho c^2}$$

- podatność akustyczna powietrza w rurze $[\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^4 \cdot \text{s}^2]$,

$$(4) \quad R_s = \frac{l \cdot S \sqrt{\rho \cdot \mu \cdot \omega}}{2\sqrt{2} A^2}$$

- akustyczna rezystancja strat wskutek wiskotycznego tarcia powietrza przy ściankach rury $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}]$,

$$(5) \quad G_p = \frac{(\eta-1) \cdot l \cdot S}{\rho c^2} \sqrt{\frac{\lambda \cdot \omega}{2 \cdot \theta \cdot \rho}}$$

- akustyczna konduktancja strat wskutek przewodnictwa cieplnego przy ściankach rury $[\text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^4 \cdot \text{s}]$.

Symbole literowe, użyte we wzorach (2) ÷ (5) i stosowane w dalszej części pracy, mają następujące znaczenia fizyczne i wartości liczbowe:

$\rho = 1.14 [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ - gęstość powietrza,

$\mu = 1.86 \cdot 10^{-5} [\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}]$ - współczynnik lepkości powietrza,

$c = 350 [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ - prędkość fali dźwiękowej w wilgotnym powietrzu o temperaturze 37°C ,

$\eta = 1.4$ - stała adyabatyczna powietrza,

$\lambda = 2.3 \cdot 10^2 [\text{J} \cdot \text{deg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$ - współczynnik przewodności cieplnej powietrza,

$\theta = 10^3 [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{deg}^{-1}]$ - ciepło właściwe powietrza.

Ponadto:

l - długość pojedynczego segmentu $[m]$,

A - powierzochnia otworu rury $[m^2]$,

S - obwód otworu rury $[m]$,

$\omega = 2\pi f$ - pulsacja częstotliwość kątowna $[s^{-1}]$.

Parametry R_w i L_w określają właściwości stratnościowe i drganiowe ścian toru głosowego, które nie są idealnie twarde i sztywne, jak to się przyjmuje w rozważaniach uproszczonych [patrz np. KACPROWSKI, MIKIEL, SZEWCZYK (1976)], ale mają skończoną mechaniczną impedancję powierzchniową Z_s o charakterze bezwładnościowym, która w zakresie częstotliwości $f > 100$ Hz może być przedstawiona w postaci szeregowego połączenia rezystancji r_s i masy m_s :

$$(6) \quad Z_s = r_s + j\omega m_s$$

gdzie: r_s $[kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$ i m_s $[kg \cdot m^{-2}]$ oznaczają odpowiednio mechaniczną rezystancję strat i masę tworzywa ścian toru głosowego na jednostkę powierzchni. Zagadnieniu wyznaczania wartości liczbowych parametrów jednostkowych r_s i m_s poświęcono sporo uwagi, przyjmując za punkt wyjścia wyniki pomiarów bezpośrednich, przeprowadzonych in vivo i in vitro na tkance łącznej w różnych miejscach ciała ludzkiego [patrz np. FRANKE (1951); NORD, FANT, BRANDERUD (1976); ISHIZAKA (1968)], lub badając właściwości drganiowe odpowiednie tłumionych fizycznych układów rezonansowych [van den BERG (1955); BOGERT (1953); DUNN (1961); FUJIMURA i LINDQUIST (1971)]. Wartości średnie uzyskane z pomiarów, a następnie zweryfikowane w badaniach modelowych, wynoszą: $r_s \approx 16 \cdot 10^3$ $[kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$ i $m_s \approx 15$ $[kg \cdot m^{-2}]$ i zostały wprowadzone do obliczeń w obecnej pracy. Ostatecznie przyjęto zatem, że:

$$(7) \quad R_s = \frac{r_s}{S \cdot l}$$

- akustyczna rezystancja strat wskutek wymuszonych drgań ścian toru głosowego $[kg \cdot m^{-4} \cdot s^{-1}]$,

$$(8) \quad L_w = \frac{m_s}{S \cdot l}$$

- masa akustyczna współdrżących ścian toru głosowego $\text{kg} \cdot \text{m}^{-4}$.

Stosując wprowadzone oznaczenia, można wyznaczyć impedancję Z_a ramion wzdłużnych oraz admitancję $Y_b = \frac{1}{Z_b}$ ramienia poprzecznego czwórnika T z rys.3c jako:

$$(9) \quad Z_a = R_s + j\omega L_s$$

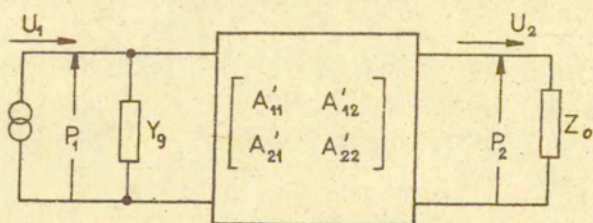
$$(10) \quad Y_b = \frac{1}{Z_b} = G_p + j\omega C_p + \frac{1}{R_w + j\omega L_w}$$

Analogowym modelem toru głosowego gardłowo-ustnego jest układ utworzony z konkatenacji n takich czwórników, z których każdy reprezentuje elementarny segment toru o długości l i opisany jest macierzą łańcuchową A_i $i = 1, 2, 3, \dots, n$ o postaci:

$$(11) \quad A_i = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Z_a}{Z_b} & ; & 2Z_a + \frac{Z_a^2}{Z_b} \\ \frac{1}{Z_b} & ; & 1 + \frac{Z_a}{Z_b} \end{bmatrix}$$

Macierz łańcuchowa takiego układu jest iloczynem n macierzy A_i (11) dla $i = 1, 2, 3, \dots, n$:

$$(12) \quad A^i = \prod_{i=1}^n A_i = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$



Rys.4. Czwórnikowy model zastępczy toru głosowego z uwzględnieniem admittancji źródła krtańowego Y_g i impedancji promieniowania ust Z_0 .

Zastępczą macierz łańcuchową przedstawionego na rys.4 czwórnikowego modelu toru głosowego z uwzględnieniem admittancji źródła krtańowego $Y_g = \frac{1}{Z_g}$ można przedstawić w postaci iloczynu:

$$(13) \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_g & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A'_{11} & A'_{12} \\ A'_{21} & A'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

Macierz ta opisuje tor głosowy z włączoną do niego na wejściu admittancją źródła krtańowego.

Relacje między akustycznymi wielkościami wejściowymi P_1, U_1 oraz wyjściowymi P_2, U_2 czwórnikowego modelu toru głosowego można wyznaczyć z równania macierzowego:

$$(14) \quad \begin{bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} U_2$$

w którym:

- P_1 - ciśnienie akustyczne w otworze głośni,
- U_1 - prędkość objętościowa w otworze głośni,
- U_2 - prędkość objętościowa w otworze ust,
- Z_0 - impedancja promieniowania ust,

przy czym: $P_2 = U_2 \cdot Z_0$ (15) jest ciśnieniem akustycznym, tj. występującym w otworze wylotowym ust.

Głównym celem, jakiemu ma służyć opracowany model symulacyjny, jest wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych (widmowych) ciśnienia akustycznego $P_2(f)$ jako finalnego produktu artykulacji, przy określonych konfiguracjach geometrycznych toru głosowego. Zagadnienie tak pojętego modelowania statycznego w domenie częstotliwości sprowadza się do obliczenia funkcji transmitancji $T(f)$, wyrażonej stosunkiem prędkości objętościowych U_2/U_1 , ze wzoru:

$$(16) \quad T = \frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{A_{22} + A_{21}Z_0}$$

w którym A_{21} i A_{22} są elementami macierzy łańcuchowej A (13). Ze wzorów (15) i (16)

$$(17) \quad P_2(f) = U_2(f) \cdot Z_0(f) = U_1(f) \cdot T(f) \cdot Z_0(f)$$

Wartości ciśnienia akustycznego $P_2(f)$ dogodnie jest wyznaczać w jednostkach względnych, odnosząc je do wartości P_2 przy częstotliwości $f = 100$ Hz oznaczonej jako $P_2(100)$. Ostatecznie względne wartości ciśnienia akustycznego w otworze ust przy częstotliwości bieżącej f , oznaczane jako $P(f)$, równają się:

$$(18) \quad P(f) = \frac{P_2(f)}{P_2(100)} = \frac{U_1(f)}{U_1(100)} \cdot \frac{Z_0(f)}{Z_0(100)} \cdot \frac{T(f)}{T(100)}$$

Stosunek $U_1(f)/U_1(100) = k = \text{const.}$ zależy jedynie od przyjętego kształtu charakterystyki częstotliwościowej źródła i jest określony stromością obwiedni widma, która np. w przyjętych trójkątnych impulsach krztaniowych jest równa -12 dB/oktawę. Stosunek $Z_0(f)/Z_0(100)$ wyraża charakterystykę częstotliwościową impedancji promieniowania ust (patrz rozdział 4.2.2).

4.2. Warunki brzegowe w matematycznym opisie modelu.

W modelu toru gardłowo-ustnego, który reprezentuje rzeczywisty układ biologiczny, uwzględniono impedancję głośni oraz impedancję promieniowania otworu wylotowego ust.

4.2.1. Impedancja głośni.

Przyjęto stosowany w większości opracowań prostopadłościenny model głośni, którego rozmiary geometryczne odpowiadają rozmiarom anatomicznym głośni dorosłego mężczyzny. Powierzchni czynna otworu głośni $A_g(t) = l \cdot w(t)$ jest funkcją zmieniającą się okresowo szerokości szczeliny $w(t)$, zależnej od stopnia rozwarcia wiązadeł głosowych. Impedancja głośni według klasycznej teorii źródła krtańowego [patrz WEGEL (1930) i van den BERG (1957)] wyrażona jest zależnością:

$$(19) \quad Z_g = R_g + j\omega L_g$$

przy czym R_g jest rezystancją, na którą składają się: rezystancja strat tarciovych przepływu ośrodka oraz rezystancja kinetyczna, związana z procesem przemiany spadku ciśnienia podgłośniowego w głośni na energię kinetyczną przepływu ośrodka. Reaktancja $j\omega L_g$ jest klasyczną reaktancją bezwładnościową masy powietrza drgającego w otworze głośni przy pominięciu efektów brzegowych wlotu i wylotu. Zatem po podstawieniu wielkości fizycznych, charakteryzujących ośrodek oraz jego przepływ, do wyrażenia (19) otrzymujemy wzór [patrz KACPROWSKI (1977a)]:

$$(20) \quad Z_g = 12\mu d \cdot l^2 \cdot A_g(t)^{-3} + 0.44 \rho A_g(t)^{-2} |U_g(t)| + j\omega \rho d A_g(t)^{-1}$$

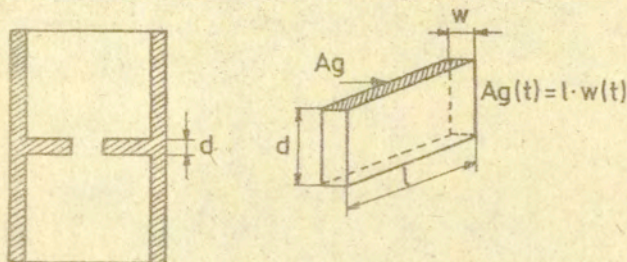
w którym:

- μ - współczynnik tarcia powietrza,
- A_g - powierzchnia czynna szczeliny głośni prostopadła do kierunku przepływu,
- l - długość szczeliny w przyjętym modelu,
- ρ - gęstość ośrodka,

u - prędkość liniowa przepływu ośrodka,

$U_g = u \cdot A_g$ - prędkość objętościowa przepływu ośrodka.

Wymiary geometryczne modelu głośni przyjęte na podstawie danych z literatury, zakładając $d = 3 \text{ mm}$ i $l = 18 \text{ mm}$ [patrz: FLANAGAN (1968)].



Rys. 5. Uproszczony model głośni.

Zależności (19) i (20) opisujące impedancję głośni są słuszne w szerokim zakresie parametrów przepływu:

$$P_g \leq 64 \text{ cm H}_2\text{O} \quad 0.1 \leq w(t) \leq 20 \text{ mm} - |U_g| \leq 2000 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

gdzie: P_g - ciśnienie podgłośniowe, $w(t)$ - szerokość szczeliny.

W celu umożliwienia badania wpływu różnych parametrów głośni na kształtowanie się widma samogłosek, wyrażenie (20) opisujące impedancję głośni przekształcono do postaci, zawierającej trzy zmienne: $w(t)$, P_g i f .

Zatem

$$(21) \quad Z_g = 3.72 \cdot 10^{-4} \frac{1}{w^3} + 2.3 \cdot 10^{-2} \frac{1}{w} \sqrt{P_g} + 1.95 \cdot 10^{-3} \frac{f}{w}$$

Ta postać wyrażenia jest bezpośrednio stosowana w programie realizującym model. Ostatecznie w realizacji algorytmu obliczeniowego zastosowano średnie wartości parametrów opisujących głośnię, w warunkach średniego wysiłku głosowego, zakładając

szerokość szczeliny głośni w $(t) = 0,12$ cm, a ciśnienie podgłośniowe $P_g = 10$ cm H_2O .

Źródło krztaniowe w układzie zastępczym zostało potraktowane jako źródło prądowe o stałej wydajności prędkości objętościowej U_g , niezależnej od konfiguracji geometrycznej teru głosowego w danej chwili. Ponadto w oparciu o ogólną teorię źródła krztaniowego przyjęto trójkątny kształt impulsów krztaniowych, o średnim nachyleniu obwiedni widma -12 dB/oktawę.

4.2.2. Impedancja promieniowania ust.

Określenie impedancji promieniowania ust sprowadza się zazwyczaj do jej aproksymowania przez funkcję opisującą impedancję promieniowania jednego z trzech pozostających do wyboru klasycznych źródeł dźwięku: (a) tłka kołowego umieszczonego nieskończenie płaskiej odgradzie, (b) tłka umieszczonego w odgradzie kulistej, symbolizującej głowę ludzką, lub (c) kuli pulsującej o promieniu R traktowanej jako źródło quasi-punktowe. Wybór optymalnego modelu może być dokonany na drodze kompromisu, popartego weryfikacją doświadczalną [patrz np. KACPROWSKI (1962), (1968)]. Przyjmując za punkt wyjścia model tłka umieszczonego w nieskończonej płaskiej odgradzie, korzystamy z wyrażenia postaci:

$$(22) \quad Z_P = \frac{\rho c}{A} \left[\left(1 - \frac{I_1(2kR)}{kR} + j \frac{S_1(2kR)}{kR} \right) \right]$$

gdzie: $I_1(x)$ i $S_1(x)$ są odpowiednio funkcjami Bessela 1 Struvego I-go rodzaju, $A = \pi \cdot R^2$ - powierzchnia tłka kołowego o promieniu R , $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ współczynnik długości fali.

Funkcje $L_1(x)$ i $S_1(x)$ wymagają rozwinięcia na szeregi potęgowe, ale w przypadku gdy $kR = \frac{2\pi R}{\lambda} \ll 1$ można wprowadzić przekształcenia upraszczające. Zależność ta jest spełniona w warunkach artykulacji w zakresie częstotliwości $f \leq 5000$ Hz. Zatem w rozwinięciu funkcji Bessela i Struvego zostały uwzględnione tylko pierwsze wyrazy szeregu, co prowadzi do uproszczenia wyrażenia (22) do postaci:

$$(23) \quad Z_P = \frac{\rho c}{A} \left[\frac{(kR)^2}{2} + j \frac{8(kR)}{3\pi} \right]$$

W celu zoptymalizowania funkcji impedancji promieniowania wprowadzono współczynnik korekcyjny $K_S(\omega)$, zależny od częstotliwości, który nadaje wyrażeniu na Z_p charakter uniwersalny, niezależny od zastosowanego modelu fizycznego. Ponadto obserwuje się tendencję [patrz np. FANT (1960)] do upraszczania współczynnika $K_S(\omega)$, bez większego wpływu na dokładność aproksymacji, co zostało potwierdzone empirycznie. Uniwersalna wersja wyrażenia, opisującego impedancję promieniowania otworu wylotowego ust, zastosowana w najnowszych modelach [patrz np. WAKITA i FANT (1978)] ma postać:

$$(24) \quad Z_p = \frac{S\omega^2}{4\pi c} K_S(\omega) + j \frac{8S\omega}{3\pi\sqrt{\pi R}}$$

gdzie:

$$(25) \quad K_S(\omega) = \begin{cases} \frac{0.6 \omega}{2\pi \cdot 1600} + 1 & \text{dla } 0 \leq \omega \leq 2\pi \cdot 1600 \\ 1.6 & \text{dla } \omega \geq 2\pi \cdot 1600 \end{cases}$$

Czynnik $K_S(\omega)$ rośnie w zakresie częstotliwości do 1600 Hz prawie proporcjonalnie do częstotliwości, powyżej 1600 Hz przybiera wartość stałą.

Podstawiając do wyrażenia (24) stałe wielkości fizyczne opisujące ośrodek, otrzymujemy uproszczone wyrażenie (26a) i (26b) zależne tylko od częstotliwości f i promienia otworu wylotowego ust R :

$$(26a) \quad Z_p = 3.8 \cdot 10^{-11} f^3 + 1.01 \cdot 10^{-7} f^2 + j 9.68 \cdot 10^{-4} \frac{f}{R};$$

dla $f \leq 1600$ Hz

oraz

$$(26b) \quad Z_p = 1.62 \cdot 10^{-7} f^2 + j 9.68 \cdot 10^{-4} \frac{f}{R}; \text{ dla } f > 1600 \text{ Hz}$$

Obie te zależności zostały w takiej postaci zastosowane w realizacji algorytmu.

5. Symulacyjny model komputerowy toru gardłowo-ustnego.

Opracowany model symulacyjny służy do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych widmowych ciśnienia akustycznego u wylotu ust, przy zadanych konfiguracjach artykulacyjnych toru głosowego, zgodnie z zależnością ogólną (18). Zagadnienie dotyczy zatem modelowania w domenie częstotliwości i sprowadza się do obliczania funkcji transmitancji T (16), wyrażonej stosunkiem prędkości objętościowych U_2/U_1 odpowiednio na wyjściu i wejściu toru.

Określenie konfiguracji artykulacyjnej toru głosowego sprowadza się do obliczenia wielkości akustycznych R_s , L_s , C_p i G_p jako funkcji częstotliwości. Wymienione parametry jednostkowe oznaczające zastępczego opisane są zależnościami (2) ÷ (5); po podstawieniu do nich stałych wielkości fizycznych otrzymuje się równoważne im zależności (27) ÷ (30), bezpośrednio wykorzystywane w programie i opisujące poszczególne elementarne segmenty toru:

$$(27) \quad R_s = 0.26 \cdot 10^{-3} \frac{1}{R^3} \sqrt{f}$$

$$(28) \quad L_s = 1.81 \cdot 10^{-4} \frac{1}{R^2}$$

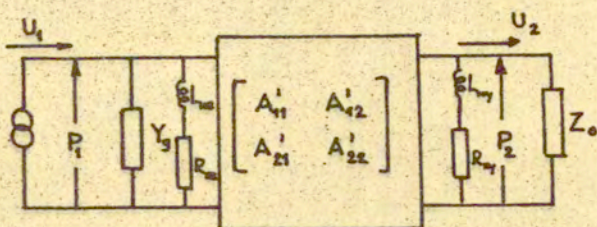
$$(29) \quad C_p = 2.22 \cdot 10^{-6} R^2 l$$

$$(30) \quad G_p = 1.18 \cdot 10^{-6} R l \sqrt{f}$$

Wobec tego przy opisie każdego segmentu do programu realizującego model symulacyjny zostają wprowadzone, jako dane wejściowe, tylko dwa parametry: jego promień R w [cm] oraz długość l w [cm].

W zbiorze parametrów opisujących elementarny segment występują wielkości L_w i R_w (rys.3), które określają straty energii wynikające z drgań ścianek toru. W wyniku dotychczasowych doświadczeń z uwzględnianiem strat w torze głosowym w kolejnych modelach symulacyjnych [36] stwierdzono, że można zastosować inne rozwiązanie schematowe niż to, jakie przedstawiono w rozdziale 4.2 (rys.3). Różnica polega na sposobie zlokalizowania

elementów akustycznych, opisujących impedancję ścian R_w i L_w w torze głosowym. W pierwszym przypadku elementy L_w i R_w umieszczone są w każdym segmencie, w drugim natomiast są sgrupowane tylko na wejściu i wyjściu toru głosowego, jak to przedstawiono na rys.6.



Rys.6. Impedancja ścian skupiona na wejściu i wyjściu toru głosowego.

Ze względu na znaczne skrócenie czasu obliczeniowego maszyny cyfrowej, uzyskane kosztem nieistotnego zmniejszania dokładności obliczeń, zdecydowano się przy realizacji modelu zastosować drugi sposób podejścia dotyczącego lokalizacji elementów L_w i R_w , skupiając je na wejściu i wyjściu toru i oznaczając je odpowiednio R_{we} , L_{we} oraz R_{wy} i L_{wy} . Wartości tych elementów stratnościowych, według danych zaczerpniętych z pracy [36], wynoszą: $R_{we} = 7.16 [g.cm^{-4}.s^4]$, $L_{we} = 0.015 [g.cm^{-4}]$ i $R_{wy} = 18.0 [g.c.^{-4}.s^4]$, $L_{wy} = 0.038 [g.cm^{-4}]$.

Impedancja głośni została wyrażona w rozdziale 4.2 zależnością (21), i do jej obliczenia wprowadza się wielkość szerokości szczeliny głośni \underline{W} w [cm], oraz wartość ciśnienia podgłośniowego $P_s [\frac{dyna}{cm^2}]$.

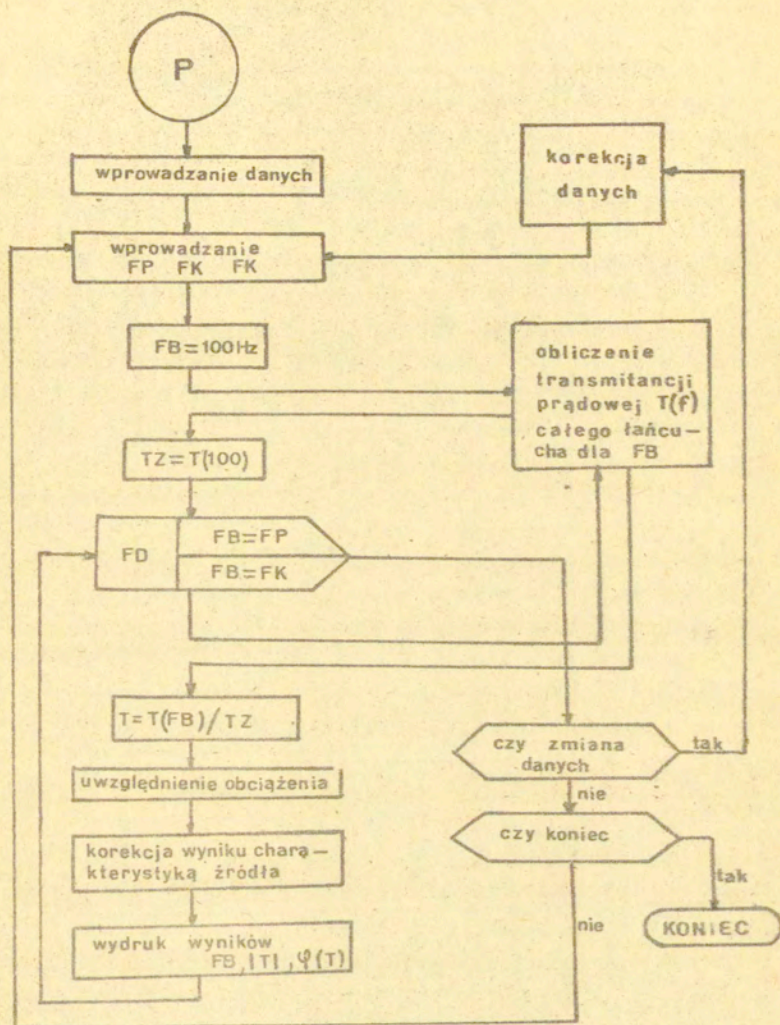
Impedancję promieniowania ust obliczono wg zależności (26a) i (26b); należy podać wartość promienia otworu wylotowego ust R , który w tym przypadku jest równy promieniowi przekroju ostatniego segmentu.

Przebieg eksperymentu steruje się podaniem częstotliwości początkowej (FP), końcowej (FK) oraz kroku (FD), wyznaczającego

odległość pomiędzy kolejnymi harmonicznymi częstotliwości podstawowej. Jako częstotliwość podstawową, względem której dokonuje się normowania wyników obliczeń, przyjęto wartość $F_0 = 100$ Hz. Obliczenia stanowiące realizację modelu toru gardłowo-ustnego były wykonywane na maszynie cyfrowej MERA-305. Ograniczone możliwości obliczeniowe zastosowanej maszyny zmuszały do wprowadzenia wielu ograniczeń w oprogramowaniu, ponieważ potrzeby algorytmu przekraczały możliwości kompilatora. Pozostałe ograniczenia wynikały z małego obszaru pamięci roboczej oraz braku możliwości prowadzenia obliczeń na liczbach zespolonych, jak również korzystania z innych podstawień jak tylko proste podstawienia arytmetyczne.

Charakterystyka transmitancji prądowo-prądowej toru gardłowo-ustnego jest wyznaczana w zakresie częstotliwości, określonym przez operatora przez podanie częstotliwości początkowej (FP), końcowej (FK) i kroku (FD). Poprzez kolejne dodawanie (FD) do wartości początkowej (FP) otrzymuje się częstotliwość bieżącą (FB). Dla ustalonej częstotliwości (FB) zależności (27) ÷ (30) wyznaczają wartości parametrów R_s , L_s , C_p i G_p poszczególnych czwórników; również Z_g i Z_o przyjmują określone wartości liczbowe.

Obliczenia w programie symulującym model toru gardłowo-ustnego wykonuje się według zależności (9) ÷ (18). Obliczone w ten sposób wartości ciśnienia akustycznego w otworze wylotowym ust są normowane do wartości ciśnienia obliczonej wg. tej samej procedury dla $FB = 100$ Hz wg. wzoru (18). Wszystkie obliczone wartości modułu i fazy $tg(\psi)$ ciśnienia akustycznego są drukowane w zadanych krokach. Oprócz wartości liczbowych wydrukowi nadana została forma wykresu, przedstawiającego przebieg modułu i fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust w funkcji częstotliwości. Po zakończeniu obliczeń program umożliwia operatorowi wprowadzenie dowolnych zmian w danych wejściowych i kontynuowanie eksperymentu. Na rys. 7 podano schemat blokowy opracowanej wersji programu MK 23.



Rys.7. Schemat blokowy wersji programu MK 23

6. Testowanie modelu symulacyjnego

6.1. Testowanie algorytmu obliczeniowego.

Słuszność algorytmu i poprawność działania programu sprawdzono na wybranym materiale testowym. Dobór testu polegał na opracowaniu takich danych wejściowych do programu, dla których efekt działania algorytmu obliczeniowego był a priori znany, albo z obliczeń przeprowadzonych innymi metodami, albo z pełnego opisu określonych zjawisk fizycznych. Pozwoliło to na porównanie wyników i ocenę poprawności działania programu.

Program realizujący model toru głosowego sprawdzano na przykładzie układu akustycznego w postaci rury o stałym przekroju kołowym, zamkniętej na jednym, a otwartej na drugim końcu i symulującej przekrój artykulatoryjny toru gardłowo-ustnego w przypadku hipotetycznej samogłoski ɛ . Częstotliwości rezonansowe takiej rury w warunkach bezstratnych wynoszą $F_1 = 500$ Hz, $F_2 = 1500$ Hz, $F_3 = 2500$ Hz i $F_4 = 3500$ Hz.

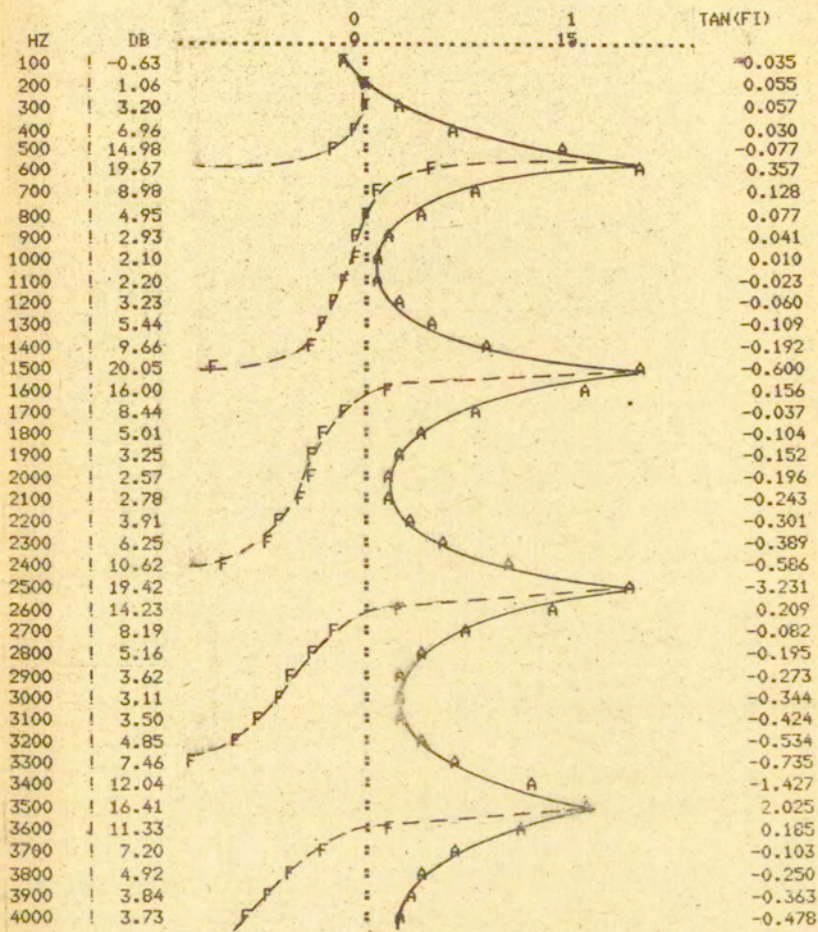
Częstotliwości rezonansowe przedstawionego układu akustycznego, otrzymane za pomocą programu MK 23 realizującego model toru, z uwzględnieniem omówionych wcześniej strat w kanale głosowym oraz impedancji promieniowania ust, są odpowiednio: $F_1 = 560$ Hz, $F_2 = 1530$ Hz, $F_3 = 2510$ Hz, $F_4 = 3490$ Hz, a odpowiadające im szerokości pasm rezonansowych wynoszą: $B_1 = 15$ Hz, $B_2 = 30$ Hz, $B_3 = 80$ Hz, a więc nieznacznie odbiegają od wartości teoretycznych. Wyniki obliczeń numerycznych zostały przedstawione na rys.8.

6.2. Badanie wpływu stopnia segmentacji wzdłużnej modelu toru głosowego na dokładność wyznaczania biegunów funkcji transmitancji.

Układ akustyczny odpowiadający artykulacji samogłoski neutralnej posłużył do zbadania wpływu stopnia kwantyzacji przestrzennej modelu, wyrażonej liczbą segmentów elementarnych, na dokładność odwzorowania biegunów funkcji transmitancji modelowanego układu. Utrzymując stały promień przekroju poprzecznego $R = 1,26$ cm oraz stałą długość $L = 18$ cm modelu toru głosowego, a zmieniając odpowiednio liczbę, a tym samym i długość

MODUŁ

FAZA



Rys.8. Przebieg modułu A i fazy F ciśnienia akustycznego u wylotu ust w funkcji częstotliwości odpowiadający samogłosce neutralnej [ɤ].

jego segmentów elementarnych, zrealizowano następujące konfiguracje:

- 18 segmentów o długości $l = 1$ cm,
- 9 segmentów o długości $l = 2$ cm,
- 6 segmentów o długości $l = 3$ cm,
- 3 segmenty o długości $l = 6$ cm,
- 2 segmenty o długości $l = 9$ cm,
- 1 segment o długości $l = 18$ cm,
- 14 segmentów o różnej długości,
- 12 segmentów o różnej długości.

Dla wszystkich wymienionych przypadków konfiguracji toru obliczono częstotliwości biegunów funkcji transmitancji układu i wyniki zamieszczone w tablicy 1.

Tablica 1. Częstotliwości biegunów funkcji transmitancji układu dla różnych konfiguracji kanału.

Konfiguracja toru	F1 [Hz]	F2 [Hz]	F3 [Hz]	F4 [Hz]	F5 [Hz]
18 seg. 1 cm	540	1530	2590	3340	4450
9 seg. 2 cm	540	1510	2510	3340	4060
6 seg. 3 cm	540	1500	2380	3040	3490
3 seg. 6 cm	530	1350	1850	-	-
2 seg. 9 cm	520	1140	-	-	-
1 seg. 18 cm	500	1050	-	-	-
14 różnych	540	1520	2570	3440	4310
12 różnych	540	1520	2530	3410	4220

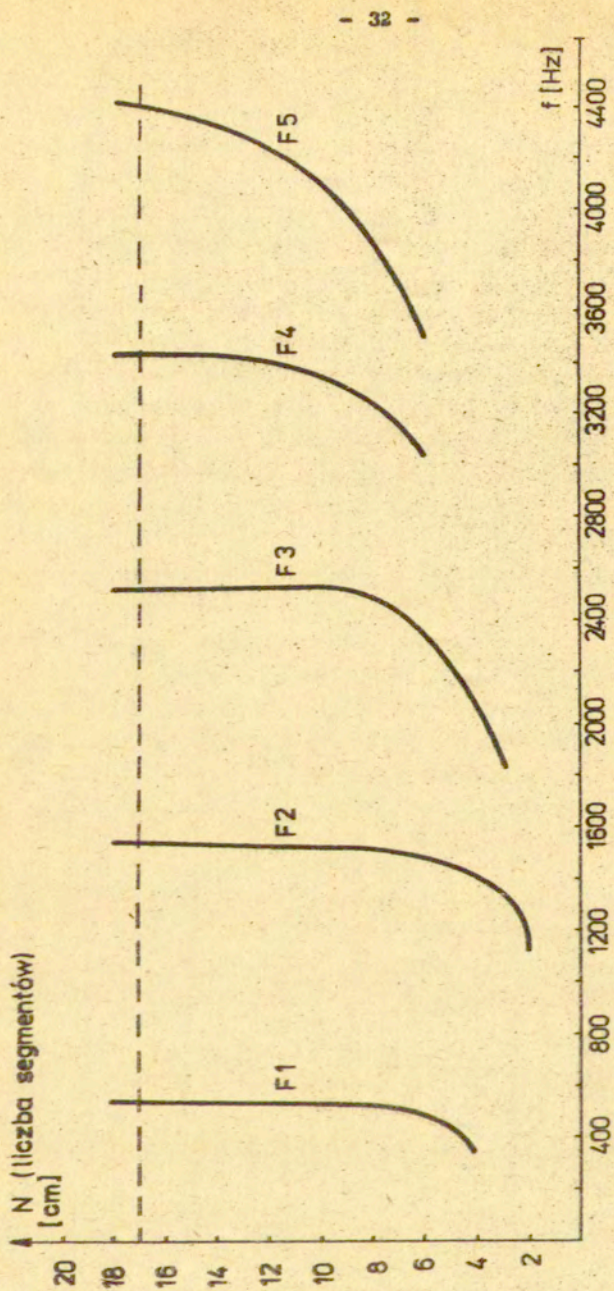
Wartości częstotliwości biegunów funkcji transmitancji układu zależą od sposobu podziału geometrycznego układu na segmenty elementarne. Analiza tej zależności na przykładzie samogłoski \exists pozwala na określenie takiej kwantyzacji, dla której zadowalająca jest zbieżność otrzymanych wyników z układem rzeczywistym, tj. analogowym układem akustycznym. Rozwiązuje to problem poprawności procesu modelowania w zależności od liczby zastosowanych segmentów i zakresu częstotliwości, w którym

model ten jest słuszny. Przeprowadzona analiza numeryczna, dotycząca określenia odpowiedniej liczby segmentów, tj. sposobu kwantyzacji w modelu toru głosowego, pozwoliła na przyjęcie 17-segmentowego modelu toru o długości pojedynczego segmentu równej 1 cm, jako poprawne przybliżenie układu rzeczywistego. W tym przypadku zostaje spełniony warunek dotyczący wymiarów geometrycznych pojedynczego segmentu, wyrażony stosunkiem jego długości l do długości fali głosowej λ : $l \ll \frac{\lambda}{4}$, co pozwala każdy segment traktować jako układ o stałych skupionych w całym zakresie częstotliwości $f \leq 5000$ Hz.

Jak wynika z rys.9, wybór 17-segmentowego modelu toru ogranicza opis fonetyczny samogłosek do trzech pierwszych formantów F_1 , F_2 i F_3 . Prawdziwość odwzorowania układu rzeczywistego jest weryfikowana w oparciu o fonetyczny opis samogłosek polskich [JASSEM (1973)] oraz o przybliżoną zgodność z konfiguracją biologicznego aparatu artykulacyjnego. Fonetyczny opis samogłosek polskich sprowadza się do podania trzech pierwszych formantów. Zatem weryfikacja otrzymanych przez symulację wyników jest możliwa w kategoriach fonetycznych. Opisany podział geometryczny aparatu artykulacyjnego daje wystarczająco przybliżony opis jego budowy. Dokładniejsza kwantyzacja toru gardłowo-ustnego nie prowadziłaby do uzyskania dokładniejszych wyników obliczeń, natomiast powodowałaby konieczność znacznego rozbudowania programu obliczeniowego oraz wydłużyłaby czas jego realizacji.

6.3. Badanie częstotliwości biegunów funkcji transmitancji układu akustycznego o zmiennej geometrii.

Na opracowanym modelu toru głosowego przeprowadzono eksperymentalną ocenę jego wrażliwości na zmiany parametrów wejściowych, związanych z artykulacją samogłosek. Analiza ta miała na celu stwierdzenie, jakie zmiany geometrii toru głosowego wpływają w sposób istotny na częstotliwości biegunów funkcji transmitancji, to jest częstotliwości formantów. Przebadano następujące przypadki:



Rys. 9. Wyznaczenie optymalnego stopnia segmentacji wzdłużnej kwantyzacji przestrzennej artykulatoryjnego modelu toru głosowego. N - liczba segmentów toru, f - częstotliwość.

- wpływ przekroju promienia przewężenia w torze głosowym,
- wpływ długości przewężenia,
- wpływ miejsca przewężenia,
- wpływ promienia otworu wylotowego ust.

Analizę testów wykonano na przykładzie neutralnej samogłoski 3 oraz na przykładzie hipotetycznej samogłoski przedniej i tylnej.

6.3.1. Badanie wpływu promienia przewężenia (wymiar pionowy) oraz jego długości (wymiar poziomy) na częstotliwości biegunów funkcji transmitancji układu akustycznego.

Analiza, obejmująca zbadanie wpływu promienia przewężenia na częstotliwości biegunów funkcji transmitancji określonego układu akustycznego, miała na celu przybliżone oszacowanie tendencji zmian częstotliwości F_1 , F_2 i F_3 w zależności od zadanych powierzchni przekrojów przewężeń, wyrażonych ich promieniami. Wnioski z tej analizy były następnie wykorzystywane przy wyznaczaniu metodami przybliżonymi przekrojów artykulatoryjnych samogłosek polskich (patrz rozdz. 7).

W celu zbadania wpływu parametrów, określających wielkość przewężenia na częstotliwości biegunów, wyznaczono częstotliwości rezonansowe F_1 , F_2 i F_3 układu akustycznego w postaci jednorodnej rury o długości $L = 17$ cm, złożonej z 17 segmentów o promieniu $R = 1.26$ cm każdy, w przypadku gdy w połowie jej długości występuje przewężenie. Wielkość przewężenia została opisana za pomocą dwóch parametrów: długości przewężenia, obejmującego odpowiednio 1, 3 lub 5 segmentów, i promienia przewężenia, jak to pokazano na rys.10. Przy stałej długości przewężenia zmieniano promień przewężenia w następujący sposób:

- przewężenie o długości 1 cm (jeden segment) zlokalizowane w segmencie nr 9 - promień przewężenia $R = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 1.0; 1.1; 1.26$ cm.,
- przewężenie o długości 3 cm (trzy segmenty) zlokalizowane w segmentach nr 8, 9, 10 oraz o długości 5 cm (pięć segmentów) zlokalizowane w segmentach nr 7, 8, 9, 10, 11 - promień przewężenia $R = 0.3; 0.6; 0.9$ cm.

Wyniki kolejnych analiz zamieszczone w tablicach 2, 3 i 4 oraz przedstawiono na rys. 11a, b, c.

Tablica 2. Wartości częstotliwości biegunów funkcji transmancji układu w przypadku przewężenia o długości 1 cm (segment nr 9) dla różnych wartości promienia przewężenia R.

R [cm] \ F	F1 [Hz]	F2 [Hz]	F3 [Hz]
0.1	310	1070	2230
0.2	370	1130	2260
0.3	460	1210	2350
0.4	490	1290	2360
0.5	520	1360	2400
0.6	540	1410	2440
0.7	550	1450	2470
0.8	550	1480	2500
0.9	560	1490	2510
1.0	560	1510	2510
1.26	560	1530	2510

Tablica 3. Wartości częstotliwości biegunów funkcji transmancji układu w przypadku, przewężenia o długości 3 cm (segmenty numer 8, 9, 10) dla trzech wartości promienia przewężenia R.

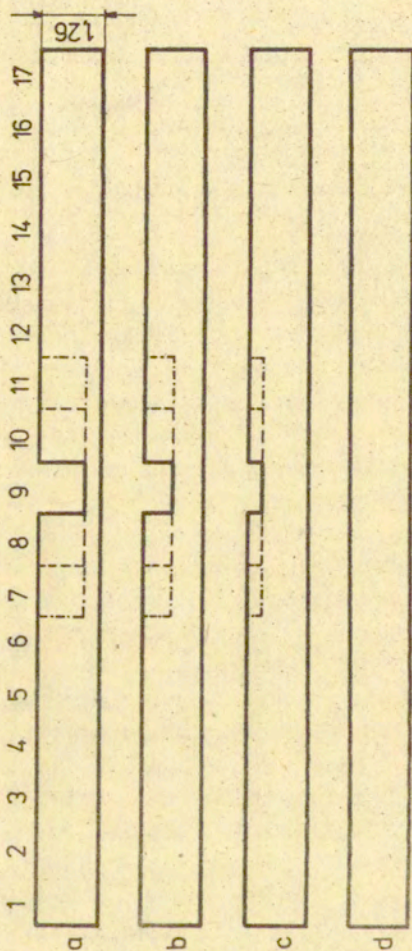
R [cm] \ F	F1 [Hz]	F2 [Hz]	F3 [Hz]
0.3	390	1240	2540
0.6	510	1360	2560
0.9	560	1470	2550
1.26	560	1530	2510

Tablica 4. Wartości częstotliwości biegunów funkcji transmitancji układu w przypadku gdy przewężenie wynosi 5 cm (segmenty nr 7, 8, 9, 10, 11) dla trzech wartości promienia przewężenia R.

R [cm] \ F	F1 [Hz]	F2 [Hz]	F3 [Hz]
0.3	390	1390	2860
0.8	490	1430	2710
0.9	560	1480	2580
1.26	560	1530	2510

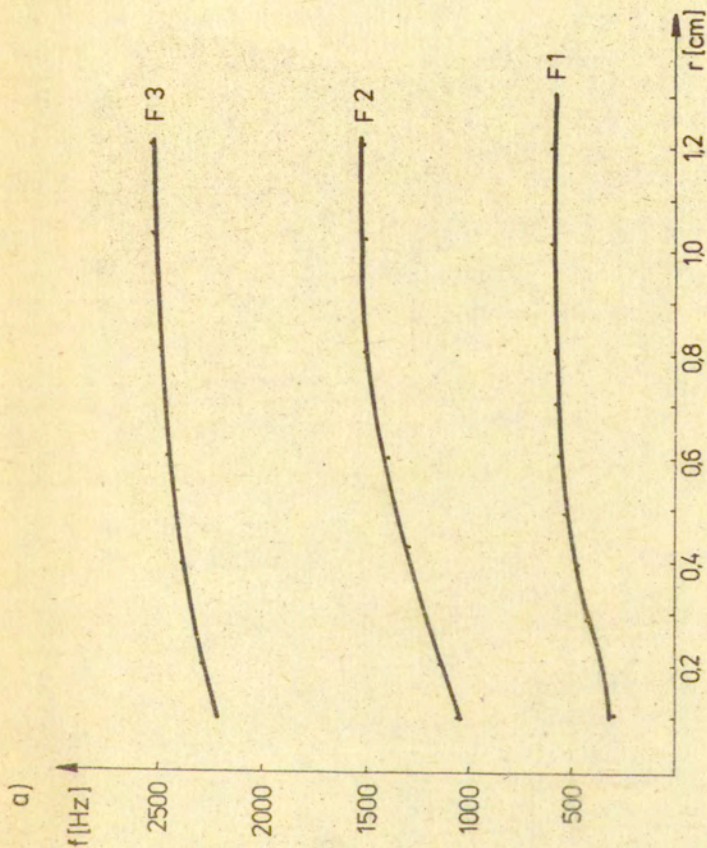
Wszystkie analizy wykazują wspólną tendencję wyników, mianowicie ze wzrostem promienia przewężenia monotonicznie wzrastają częstotliwości biegunów F1, F2 funkcji transmitancji toru głosowego. Największe zmiany częstotliwości formantowych F1, F2 i F3 w stosunku do wartości odpowiadających rurze o stałym przekroju występują, co było do przewidzenia, w przypadku, gdy przewężenie jest największe, tzn. gdy jego promień wynosi 0.3 cm. Najbardziej istotny wpływ przekroju przewężenia na częstotliwości rezonansowe rury występują w zakresie promienia 0.3 - 0.9 cm. Przy większych wartościach promienia przewężenia częstotliwości formantowe nie odbiegają od wartości teoretycznych częstotliwości rezonansowych, odpowiadających rurze o stałym przekroju. Natomiast przy promieniach przewężenia $R \leq 0.3$ cm wartości częstotliwości rezonansowych układu stają się nieporównywalne z wartościami częstotliwości rezonansowych rury o stałym przekroju, ponieważ w takim przypadku układ zachowuje się jak dwa oddzielne układy akustyczne, słabo sprzężone ze sobą poprzez wąskie przewężenie. Jedyną anomalię wykazuje przebieg zmian częstotliwości F3 w przypadku gdy długość przewężenia wynosi ok. 5 cm.

Zastosowanie wniosków wynikających z przeprowadzonych analiz pozwala na świadome sterowanie eksperymentem, polegającym na celowych zmianach określonych parametrów konfiguracji toru głosowego, w celu doboru częstotliwości formantowych symulowanych samogłosek.

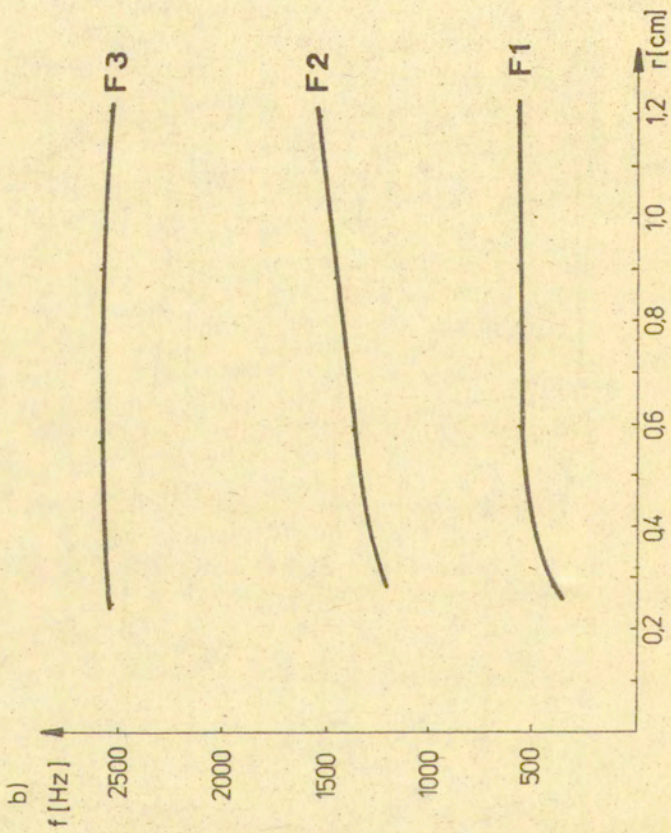


Promień prześwietlenia : a) 0,3 cm , b) 0,6 cm , c) 0,9 cm , d) 1,26 cm

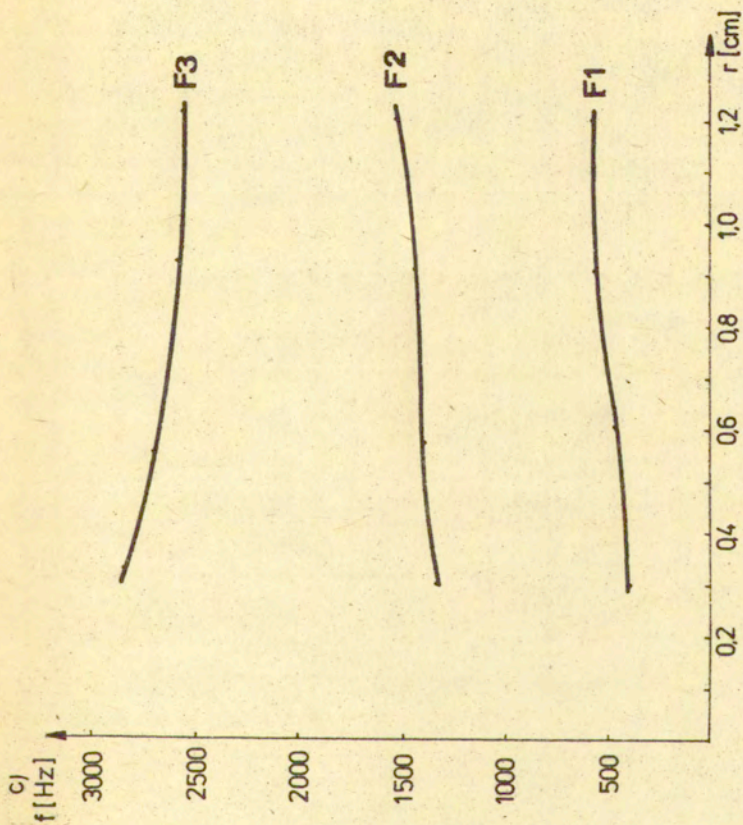
Bys.10. Przykłady konfiguracji toru głosowego, w przypadku gdy występuje prześwietlenie o długości: a) 1 cm, b) 3 cm, c) 5 cm, dla trzech wartości promienia prześwietlenia $R = 0.3; 0.6; 0.9$ cm.



Rys. 11a.



Rys. 11b.



Rys.11. Częstotliwości rezonansowe F_1 , F_2 , F_3 układu akustycznego w postaci rury z przewężeniem w połowie jej długości, dla różnych wartości promienia przewężenia, w przypadku, gdy długość przewężenia wynosi: a 1 cm, b 3 cm, c 5 cm.

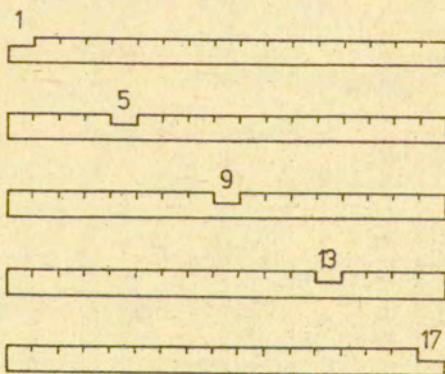
6.3.2. Badanie wpływu miejsca przewężenia w torze głosowym na częstotliwości biegunów funkcji transmitancji układu.

Analizę dotyczącą badania wpływu miejsca przewężenia na częstotliwości biegunów funkcji transmitancji układu wykonano początkowo na przykładzie hipotetycznej samogłoski \exists , a następnie na przykładzie wybranej samogłoski [i]. O wyborze tej właśnie samogłoski zdecydowały następujące względy:

- wyraźnie określone miejsca przewężenia w przekroju artykulatoryjnym toru głosowego, przypadające na segmenty nr 11, 12, 13, 14,
- możliwość przesuwania miejsca przewężenia w kierunku głośni i w kierunku ust,
- dogodnie rozmieszczenie względem siebie częstotliwości formantowych $F_1 \approx 290$ Hz, $F_2 \approx 2390$ Hz, $F_3 \approx 2840$ Hz, gdyż duże odległości między kolejnymi formantami pozwalają na ich przesuwanie w dostatecznie szerokim zakresie bez ewentualnego nakładania się na siebie.

Wybrana samogłoska stanowi dogodny materiał testowy i pozwala na wyciągnięcie uogólnionych wniosków.

W pierwszym etapie analizy przesuwano miejsce przewężenia wzdłuż rury o długości równej 17 cm, odzwierciedlającej konfigurację toru głosowego, odpowiadającego samogłosce neutralnej \exists rys.12 .



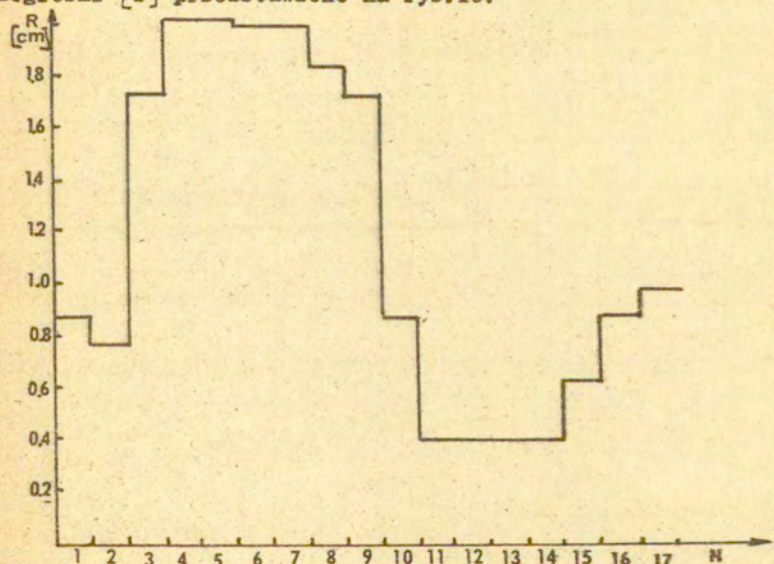
Rys.12. Położenie miejsca przewężenia o promieniu 0.3 cm względem toru głosowego.

Obliczenia prowadzono dla przewężenia o promieniu $R = 0.3$ cm i wyniki zamieszczono w tabelicy 5.

Tablica 5. Wpływ zmiany położenia miejsca przewężenia w torze głosowym na F1, F2 i F3 na przykładzie samogłoski

Nr segm.	F1 [Hz]	F2 [Hz]	F3 [Hz]
1	580	1610	2650
5	550	970	2170
9	450	1210	2310
13	390	1550	2140
17	340	1200	2250
Ξ	560	1530	2510

Drugi etap analizy dotyczył oszacowania wpływu miejsca artykulacji na F1, F2 i F3 na przykładzie samogłoski [i]. Przyjętą do analizy konfigurację toru głosowego, odpowiadającą układowi efektorów artykulacyjnych w czasie wymawiania samogłoski [i] przedstawiono na rys.13.



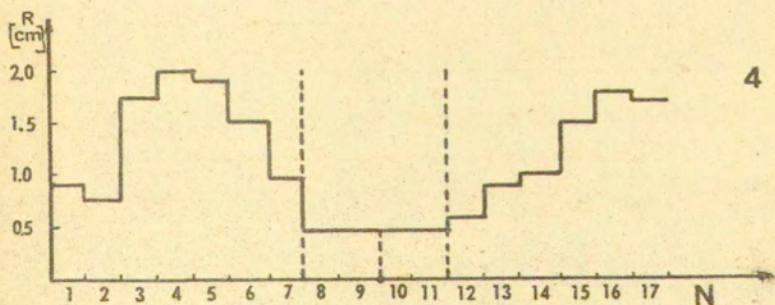
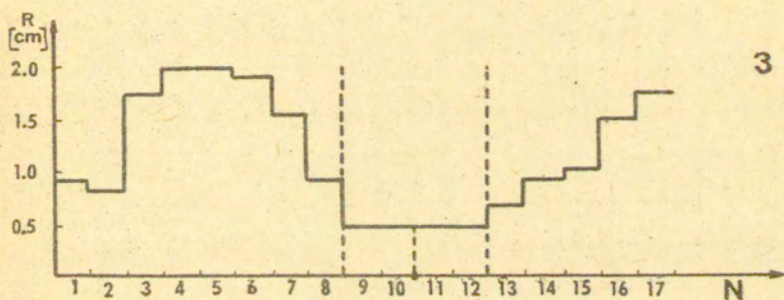
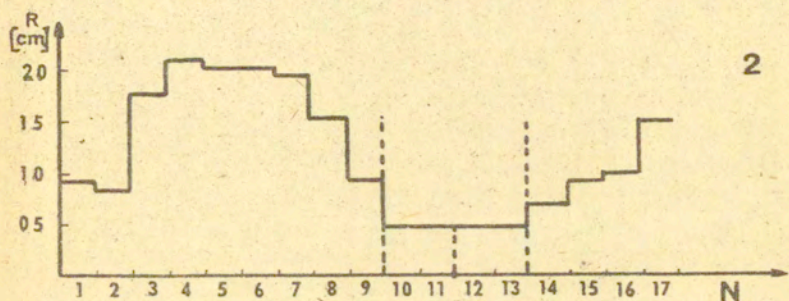
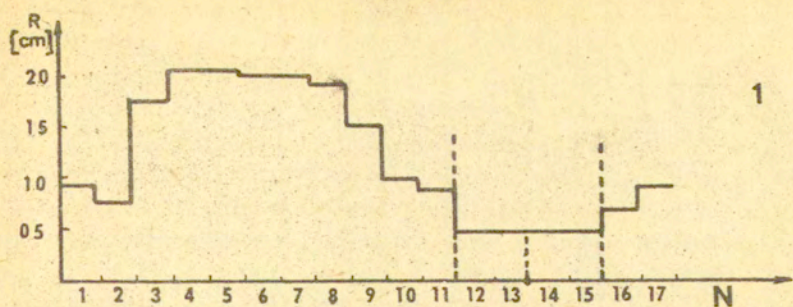
Rys.13. Przekrój artykulacyjny toru głosowego odpowiadający samogłosce [i].

W czasie analizy przesuwano miejsce przewężenia najpierw w kierunku otworu wylotowego ust (rys.14.1), a następnie w kierunku głośni (rys.14.2-7), przy zachowaniu stałej objętości modelowanego kanału.

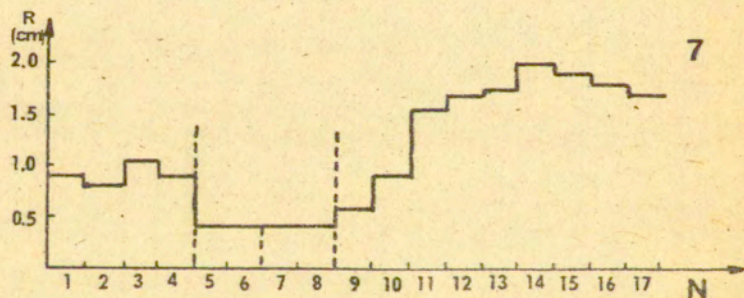
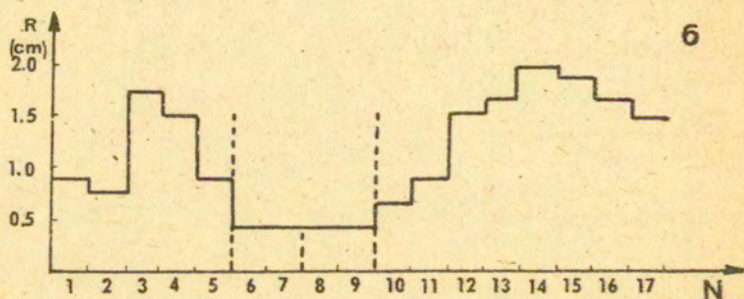
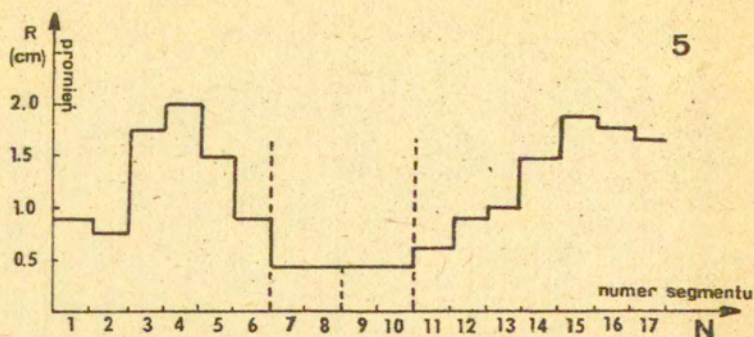
Badanie wpływu miejsca artykulacji na częstotliwości biegunów funkcji transmitancji jest równoważne z analizą wpływu położenia środka przewężenia toru głosowego na częstotliwości formantowe. W przypadku samogłoski [i] środek przewężenia przekroju artykulacyjnego przypada na granicy segmentów nr 12 i 13. Położenie środka przewężenia decyduje o tym, że samogłoska [i] jest samogłoską skrajnie przednią. Przesuwanie środka przewężenia w kierunku głośni powoduje wzrost pierwszego formantu przy jednoczesnym obniżaniu F2 (patrz rys.15). Jest to zgodne z fonetycznym opisem samogłosek polskich [JASSEM (1973)], gdzie relacja «przednia - tylna» samogłoska odpowiada relacji «wysoka - niska» częstotliwość F2.

Tablica 6. Częstotliwości formantowe F1, F2 i F3 na przykładzie samogłoski i dla różnych położzeń środka przewężenia w kanale głosowym, zgodnie z oznaczeniami 1 - 7 na rys.14.

Położenie środk przewężenia	F1 [Hz]	F2 [Hz]	F3 [Hz]
1	290	2390	2840
1	290	2260	3040
2	320	2470	2900
3	360	2110	3130
4	420	1740	3030
5	510	1450	2850
6	660	1150	2850
7	870	1130	2790

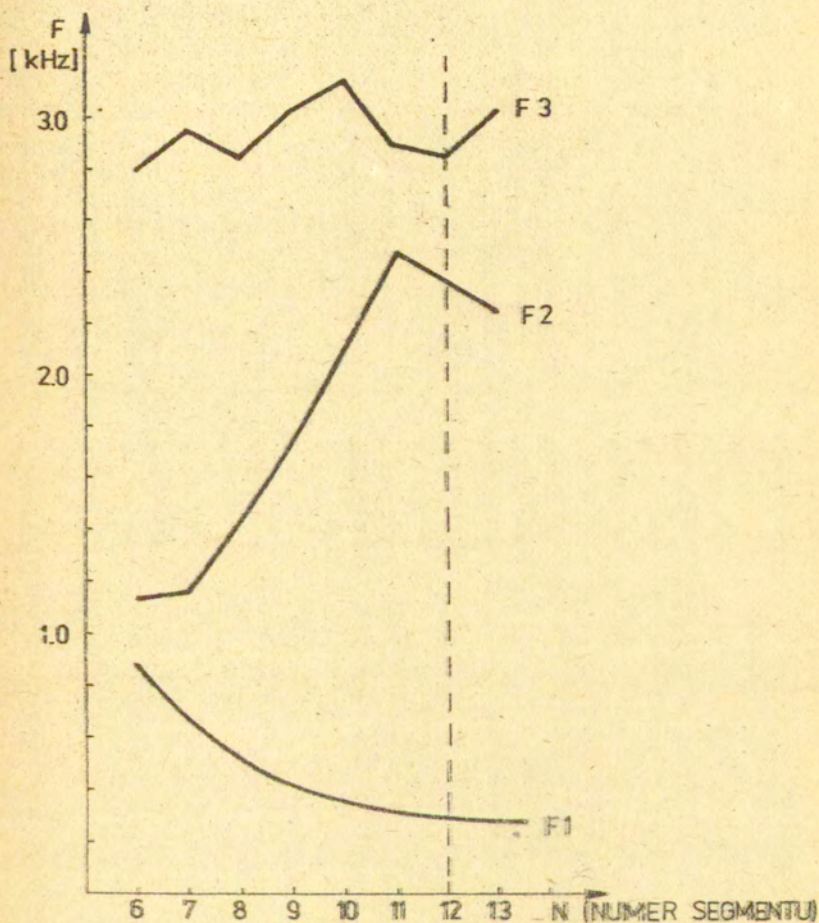


Rys.14



Rys. 14. Sposób przemieszczania przewężenia wzdłuż kanału głosowego na przykładzie samogłoski [i].

MIEJSCE ARTYKULACJI



Rys.15. Badanie wpływu miejsca artykulacji ńrodek przewężenia na F1, F2, F3 na przykłądzie samogłoski [i]..

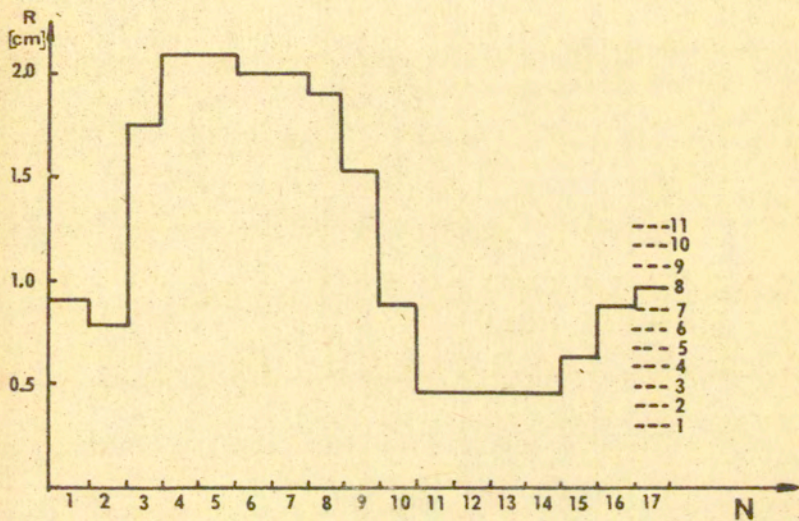
6.3.3. Badanie zmian częstotliwości formantowych w zależności od promienia otworu wylotowego ust.

Otwór wylotowy ust w opracowanym modelu symulacyjnym kanału głosowego jest wyrażony za pomocą promienia ostatniego segmentu. Analizę wpływu promienia tego segmentu na częstotliwości biegunów toru głosowego przeprowadzono na przykładzie uogólnionych konfiguracji toru, tj. na przykładzie hipotetycznej samogłoski przedniej (rys.16) i tylnej (rys.18).

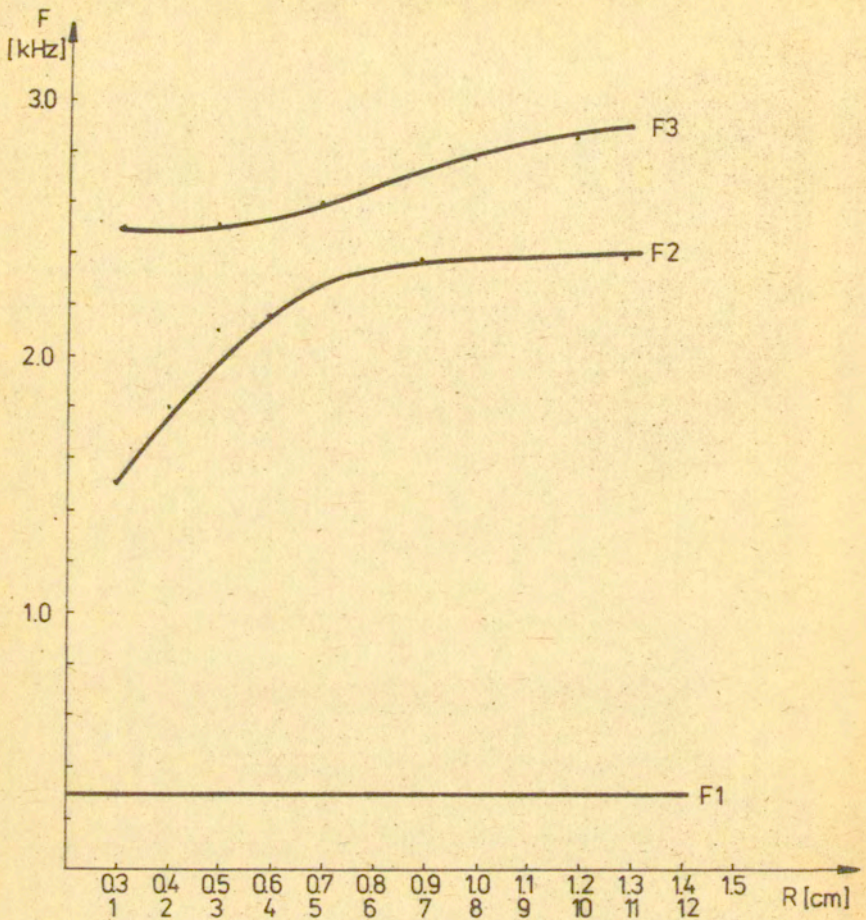
Analizę przeprowadzono dla 11 różnych wartości promienia otworu wylotowego ust i otrzymane wyniki zamieszczono w tabelicy 7.

Tablica 7. Wartości F1, F2, F3 odpowiadające wartościom promienia otworu wylotowego ust na przykładzie samogłoski przedniej.

Nr	Promień otworu [cm]	F1 [Hz]	F2 [Hz]	F3 [Hz]
1	0,3	280	1490	2470
2	0,4	290	1760	2480
3	0,5	290	1980	2500
4	0,6	290	2150	2530
5	0,7	290	2270	2580
6	0,8	290	2320	2650
7	0,9	290	2360	2720
8	1,0	290	2370	2760
9	1,1	290	2380	2820
10	1,2	290	2390	2860
11	1,3	290	2390	2890
12	1,4	290	2390	2890



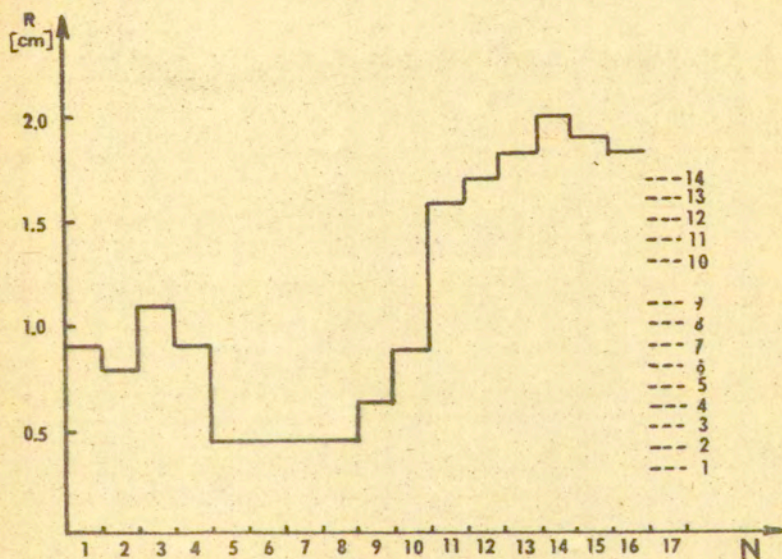
Rys.16. Konfiguracja kanału głosowego odpowiadająca hipotetycznej samogłosce przedniej.



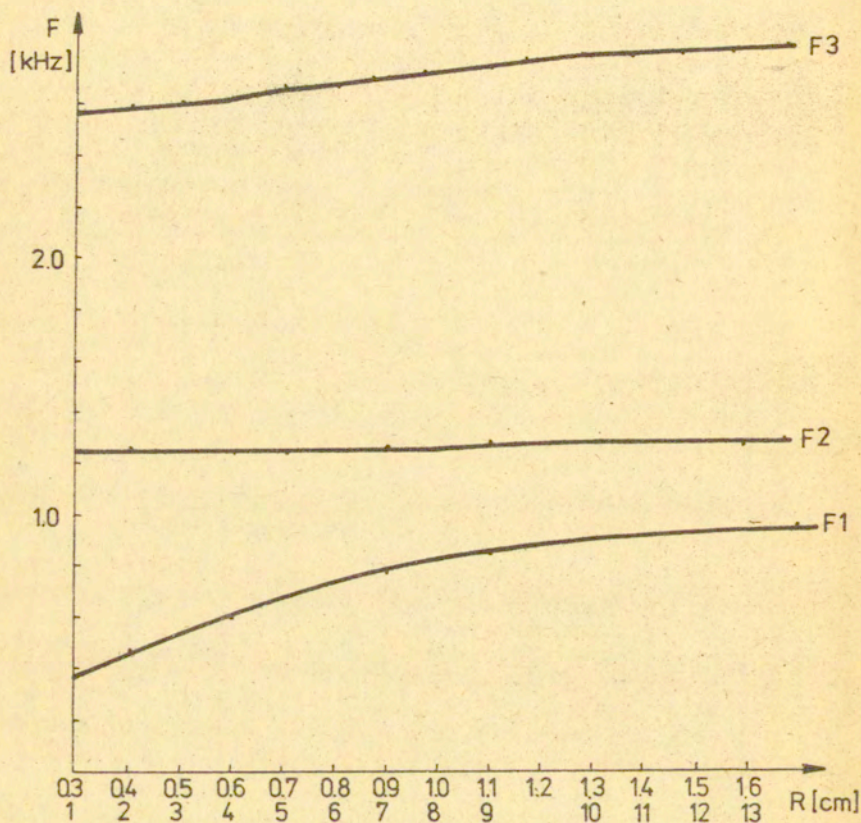
Rys.17. Przebieg F_1 , F_2 , F_3 w zależności od promienia otworu wylotowego ust dla samogłoski przedniej.

Tablica 8. Wartości częstotliwości formantowych dla różnych wartości promienia otworu wylotowego ust na przykładzie samogłoski tylnej.

Nr	Promień otworu [cm]	F1 [Hz]	F2 [Hz]	F3 [Hz]
1	0,3	360	1250	2560
2	0,4	450	1250	2580
3	0,5	530	1240	2600
4	0,6	610	1240	2620
5	0,7	670	1250	2650
6	0,8	720	1250	2670
7	0,9	770	1250	2690
8	1,0	810	1260	2710
9	1,1	840	1270	2730
10	1,3	880	1280	2770
11	1,4	900	1280	2780
12	1,5	920	1290	2790



Rys.18. Konfiguracja toru głosowego odpowiadająca hipotetycznej samogłosce tylnej.



Rys.19. Przebieg F1, F2, F3 w zależności od promienia otworu wylotowego ust dla samogłoski tylnej.

Wpływ promienia otworu wylotowego ust na częstotliwości formantowe samogłoski przedniej okazał się znaczący w przypadku drugiego formantu: ze wzrostem promienia otworu wylotowego ust wzrasta częstotliwość F2. Natomiast w przypadku samogłoski tylnej promień otworu wylotowego ust wpływa najwyraźniej na pierwszy zakres formantowy: wzrost promienia powoduje podwyższone F1.

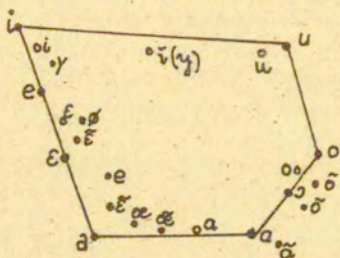
Przeprowadzona analiza miała przede wszystkim na celu wykazanie, w jakim stopniu zmiany promienia otworu wylotowego ust wpływają na częstotliwości formantowe samogłosek oraz stwierdzenie, jak dalece można zmieniać parametry opisujące ostatni segment, który reprezentuje stopień zwarcia ust, aby w sposób przybliżony odwzorowywać rzeczywiste warunki labializacji samogłosek, nie zmieniając jednocześnie właściwego opisu ich struktury formantowej.

7. Wyznaczanie hipotetycznych przekrojów artykulacyjnych kanału głosowego dla sześciu samogłosek polskich oraz ich struktura formantowa wyznaczona za pomocą programu MK 23.

7.1. Metoda postępowania.

Cyfrowy model kanału głosowego został zweryfikowany pod względem właściwości aproksymacyjnych na materiale fonetycznym języka polskiego. Danymi wejściowymi do programu realizującego cyfrowy model toru głosowego były promienie przekrojów poprzecznych kolejnych segmentów hipotetycznych kanału głosowego. Dla samogłosek polskich nie istnieją dokładnie opracowane przekroje artykulacyjne toru gardłowo-ustnego w czasie fonacji. Te z nich, które można znaleźć w różnych opracowaniach medycznych i fonologicznych [patrz np. BOLLA (1981)] mają charakter orientacyjny i nie zawierają wystarczającej ilości informacji. Ze względu na brak możliwości wykonania zdjęć tomograficznych toru głosowego w czasie wymawiania samogłosek polskich zdecydowano się na pośrednią metodę wyznaczania przekrojów artykulacyjnych. Zastosowana metoda polegała na wykorzystaniu dostępnych przekrojów artykulacyjnych toru gardłowo-ustnego dla samogłosek francuskich [patrz np. MRAYATI (1975)]

W tym celu przeprowadzono dokładną analizę porównawczą samogłosek polskich i francuskich pod względem ich miejsca i sposobu artykulacji, wyrażonego ich wzajemnym usytuowaniem na wieloboku samogłoskowym (patrz rys.20), oraz pod względem ich episu fonetycznego, wyrażonego w terminach trzech pierwszych formantów F1, F2 i F3 (por. tablice 9 i 10). Z jedenastu samogłosek francuskich wybrano te, które z artykulacyjnego i fonetycznego punktu widzenia są najbardziej zbliżone do samogłosek polskich. Otrzymane w ten sposób hipotetyczne przekroje artykulacyjne sześciu samogłosek polskich porównano dodatkowo ze zdjęciami rentgenowskimi i innymi dostępnymi orientacyjnymi danymi anatomicznymi biologicznego toru głosowego gardłowo-ustnego w celu sprawdzenia, czy przyjęte modele są poprawnym przybliżeniem konfiguracji geometrycznej efektorów artykulacyjnych organu mowy. Uzyskane wyniki zestawione są w postaci numerycznej i graficznej w rozdziale 7.2.



Rys.20. Wielobok samogłoskowy: o - samogłoski polskie
o - samogłoski francuskie.

Tablica 9. Częstotliwości formantowe samogłosek francuskich [patrz MRAYATI (1976)].

	[u]	[o]	[ɔ]	[ɑ]	[a]	[ɛ]	[e]	[i]	[ɣ]	[φ]	[œ]
F1 [Hz]	240	350	510	650	725	510	350	240	240	350	510
F2 [Hz]	750	865	1000	1200	1300	1950	2200	2500	1850	1600	1400
F3 [Hz]	2200	2450	2250	2200	2640	2300	2500	3140	2110	2500	2300

Tablica 10. Częstotliwości formantowe samogłosek polskich [patrz JASSEM (1973)] .

F [Hz] / SAMOGL.	F1 [Hz]	F2 [Hz]	F3 [Hz]
i	220	2400	3045
ɨ	324	2064	2679
e	568	1877	2647
a	751	1268	2526
o	540	922	2619
u	285	675	2580

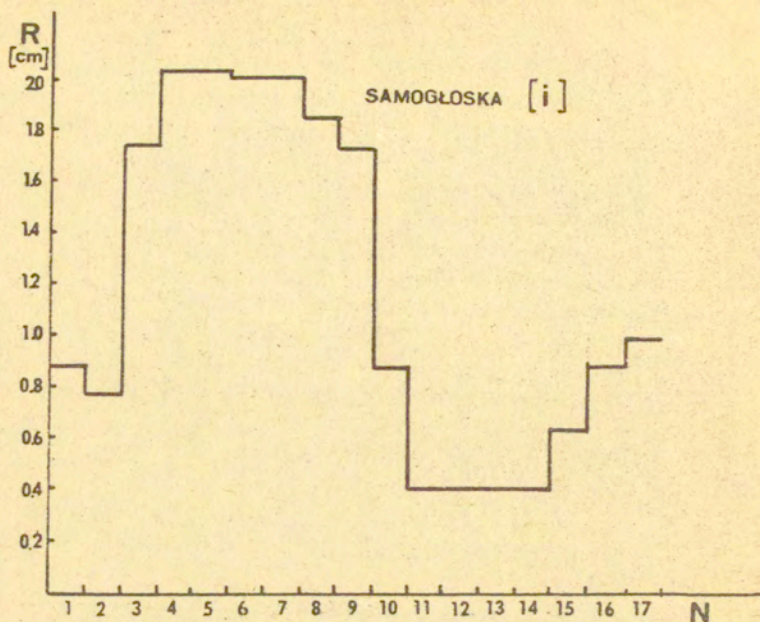
7.2. Hipoteczne przekroje artykulacyjne samogłosek polskich.

SAMOGŁOSKA [ɨ]

WARTOŚCI PARAMETROW MODELOWANIA
LICZBA SEGMENTÓW 17

SEGMENT NR 1	L = 0.999	R = 0.869
SEGMENT NR 2	L = 0.999	R = 0.789
SEGMENT NR 3	L = 0.999	R = 1.749
SEGMENT NR 4	L = 0.999	R = 2.009
SEGMENT NR 5	L = 0.999	R = 2.009
SEGMENT NR 6	L = 0.999	R = 1.999
SEGMENT NR 7	L = 0.999	R = 1.999
SEGMENT NR 8	L = 0.999	R = 1.899
SEGMENT NR 9	L = 0.999	R = 1.539
SEGMENT NR 10	L = 0.999	R = 0.869
SEGMENT NR 11	L = 0.999	R = 0.429
SEGMENT NR 12	L = 0.999	R = 0.429
SEGMENT NR 13	L = 0.999	R = 0.429
SEGMENT NR 14	L = 0.999	R = 0.429
SEGMENT NR 15	L = 0.999	R = 0.639
SEGMENT NR 16	L = 0.999	R = 0.889
SEGMENT NR 17	L = 0.999	R = 1.099

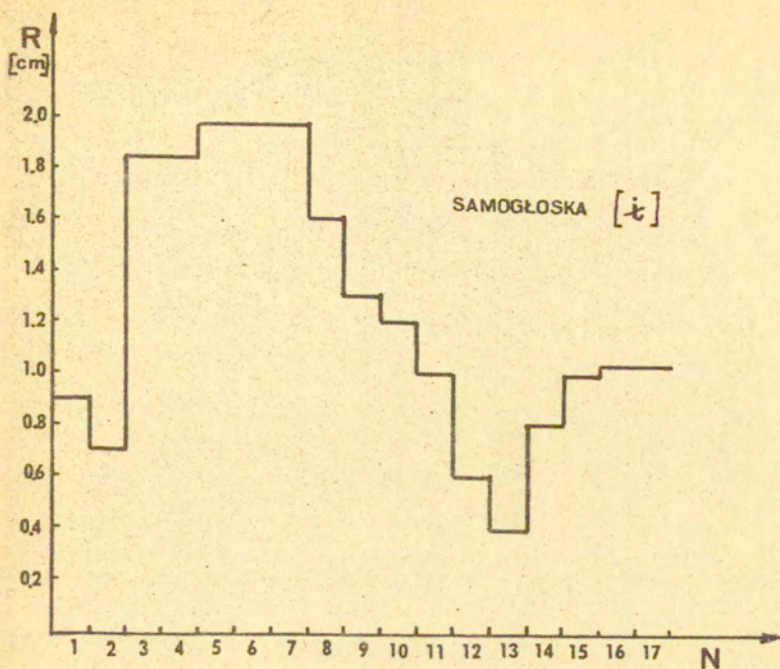
L - długość segmentu [cm], R - promień segmentu [cm].



Rys.21. Hipotetyczny przekrój artykulacyjny odpowiadający samogłosce [i].

SAMOGŁOSKA [i]

LICZBA SEGMENTÓW		17	
SEGMENT NR	1	L = 0.999	R = 0.899
SEGMENT NR	2	L = 0.999	R = 0.699
SEGMENT NR	3	L = 0.999	R = 1.849
SEGMENT NR	4	L = 0.999	R = 1.849
SEGMENT NR	5	L = 0.999	R = 1.919
SEGMENT NR	6	L = 0.999	R = 1.919
SEGMENT NR	7	L = 0.999	R = 1.919
SEGMENT NR	8	L = 0.999	R = 1.599
SEGMENT NR	9	L = 0.999	R = 1.299
SEGMENT NR	10	L = 0.999	R = 1.199
SEGMENT NR	11	L = 0.999	R = 0.999
SEGMENT NR	12	L = 0.999	R = 0.599
SEGMENT NR	13	L = 0.999	R = 0.399
SEGMENT NR	14	L = 0.999	R = 0.799
SEGMENT NR	15	L = 0.999	R = 0.999
SEGMENT NR	16	L = 0.999	R = 1.149
SEGMENT NR	17	L = 0.999	R = 1.099

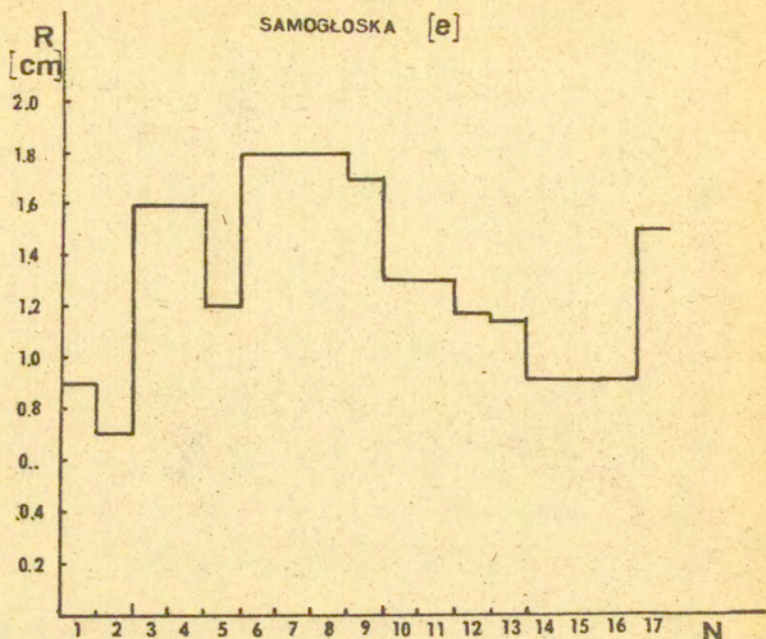


Rys.22. Przekrój artykulacyjny odpowiadający samogłosce [i]

SAMOGŁOSKA [e]

LICZBA SEGMENTOW 17

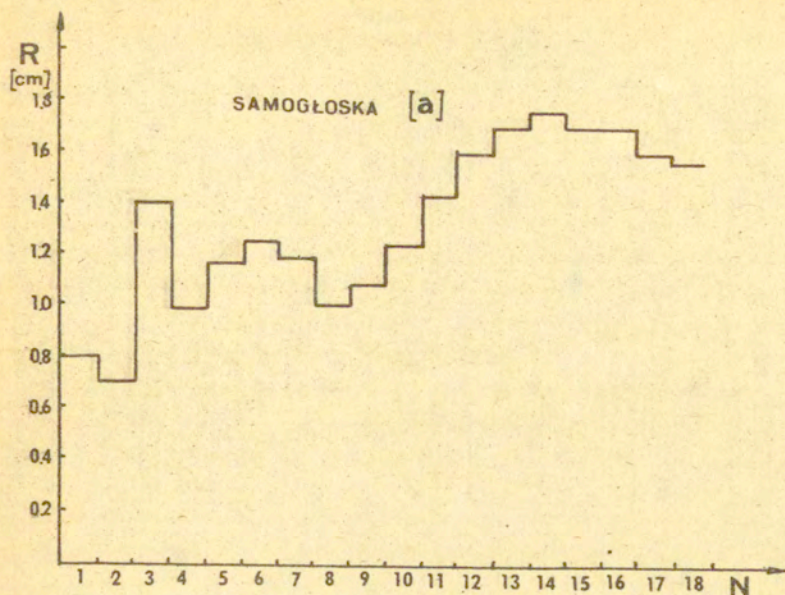
SEGMENT NR	1	L = 0.999	R = 0.899
SEGMENT NR	2	L = 0.999	R = 0.699
SEGMENT NR	3	L = 0.999	R = 1.599
SEGMENT NR	4	L = 0.999	R = 1.599
SEGMENT NR	5	L = 0.999	R = 1.119
SEGMENT NR	6	L = 0.999	R = 1.799
SEGMENT NR	7	L = 0.999	R = 1.799
SEGMENT NR	8	L = 0.999	R = 1.799
SEGMENT NR	9	L = 0.999	R = 1.699
SEGMENT NR	10	L = 0.999	R = 1.299
SEGMENT NR	11	L = 0.999	R = 1.299
SEGMENT NR	12	L = 0.999	R = 1.169
SEGMENT NR	13	L = 0.999	R = 1.129
SEGMENT NR	14	L = 0.999	R = 0.899
SEGMENT NR	15	L = 0.999	R = 0.899
SEGMENT NR	16	L = 0.999	R = 0.899
SEGMENT NR	17	L = 0.999	R = 1.499



Rys.23. Przekrój artykulacyjny odpowiadający samogłosce [e]

SAMOGŁOSKA [a]

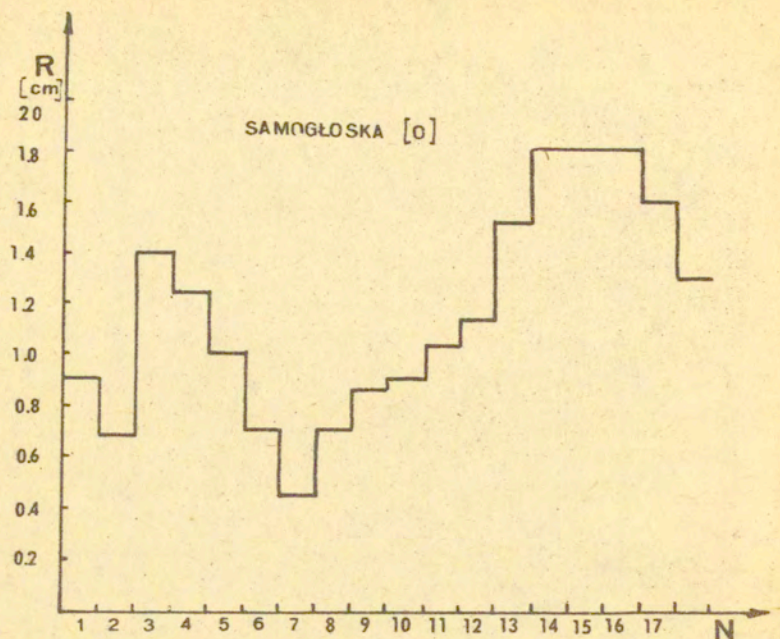
LICZBA SEGMENTÓW		18	
SEGMENT NR	1	L = 0.999	R = 0.799
SEGMENT NR	2	L = 0.999	R = 0.689
SEGMENT NR	3	L = 0.999	R = 1.399
SEGMENT NR	4	L = 0.999	R = 0.979
SEGMENT NR	5	L = 0.999	R = 1.169
SEGMENT NR	6	L = 0.999	R = 1.259
SEGMENT NR	7	L = 0.999	R = 1.119
SEGMENT NR	8	L = 0.999	R = 0.999
SEGMENT NR	9	L = 0.999	R = 1.119
SEGMENT NR	10	L = 0.999	R = 1.259
SEGMENT NR	11	L = 0.999	R = 1.439
SEGMENT NR	12	L = 0.999	R = 1.599
SEGMENT NR	13	L = 0.999	R = 1.699
SEGMENT NR	14	L = 0.999	R = 1.739
SEGMENT NR	15	L = 0.999	R = 1.699
SEGMENT NR	16	L = 0.999	R = 1.699
SEGMENT NR	17	L = 0.999	R = 1.599
SEGMENT NR	18	L = 0.999	R = 1.549



Rys.24. Przekrój artykulacyjny odpowiadający samogłosce [a]

SAMOGŁOSKA [o]

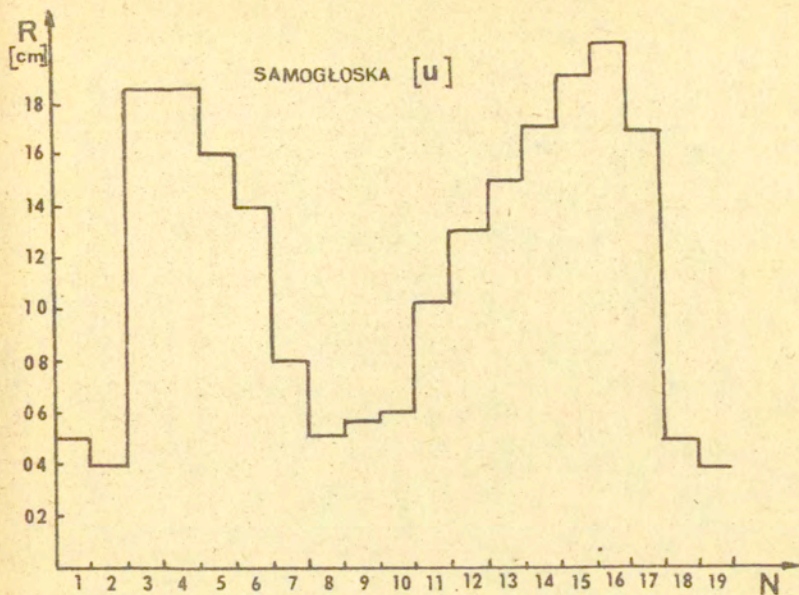
LICZBA SEGMENTOW		18	
SEGMENT NR	1	L = 0.999	R = 0.899
SEGMENT NR	2	L = 0.999	R = 0.669
SEGMENT NR	3	L = 0.999	R = 1.399
SEGMENT NR	4	L = 0.999	R = 1.259
SEGMENT NR	5	L = 0.999	R = 1.008
SEGMENT NR	6	L = 0.999	R = 0.669
SEGMENT NR	7	L = 0.999	R = 0.449
SEGMENT NR	8	L = 0.999	R = 0.669
SEGMENT NR	9	L = 0.999	R = 0.849
SEGMENT NR	10	L = 0.999	R = 0.899
SEGMENT NR	11	L = 0.999	R = 1.129
SEGMENT NR	12	L = 0.999	R = 1.339
SEGMENT NR	13	L = 0.999	R = 1.579
SEGMENT NR	14	L = 0.999	R = 1.799
SEGMENT NR	15	L = 0.999	R = 1.799
SEGMENT NR	16	L = 0.999	R = 1.799
SEGMENT NR	17	L = 0.999	R = 1.599
SEGMENT NR	18	L = 0.999	R = 1.229



Rys.25. Przekrój artykulacyjny odpowiadający samogłosce [o]

SAMOGŁOSKA [u]

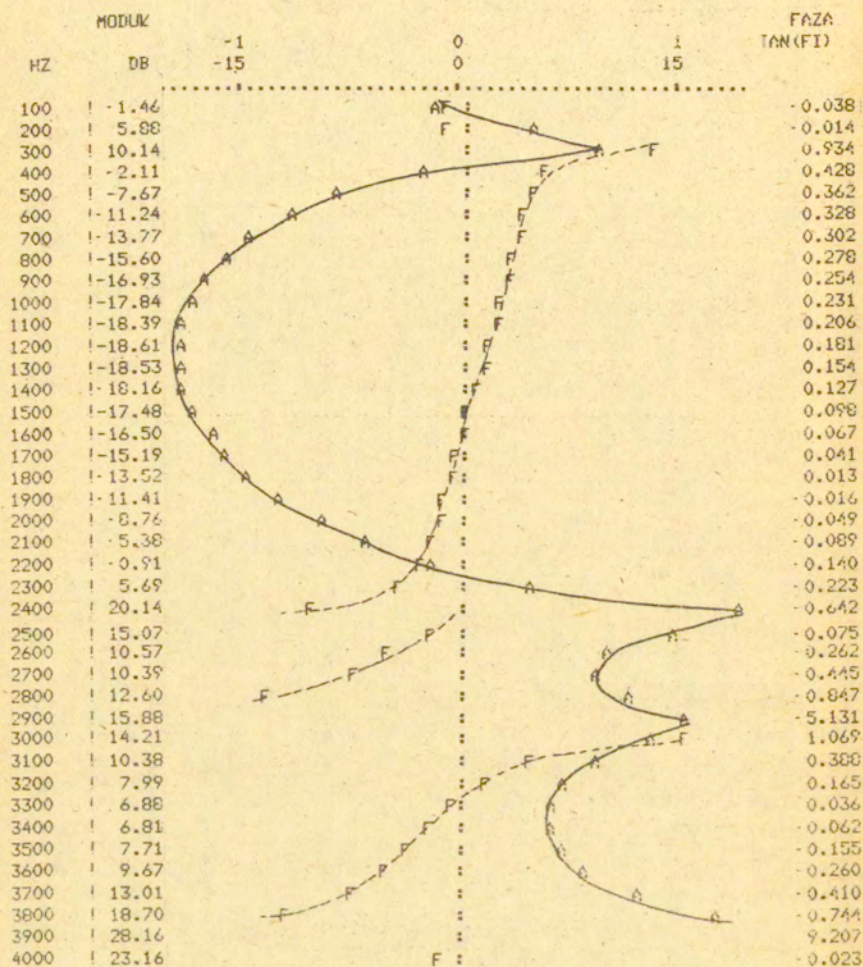
LICZBA SEGMENTÓW		19	
SEGMENT NR	1	L = 0.999	R = 0.500
SEGMENT NR	2	L = 0.999	R = 0.399
SEGMENT NR	3	L = 0.999	R = 1.849
SEGMENT NR	4	L = 0.999	R = 1.849
SEGMENT NR	5	L = 0.999	R = 1.599
SEGMENT NR	6	L = 0.999	R = 1.399
SEGMENT NR	7	L = 0.999	R = 0.799
SEGMENT NR	8	L = 0.999	R = 0.500
SEGMENT NR	9	L = 0.999	R = 0.549
SEGMENT NR	10	L = 0.999	R = 0.599
SEGMENT NR	11	L = 0.999	R = 1.099
SEGMENT NR	12	L = 0.999	R = 1.299
SEGMENT NR	13	L = 0.999	R = 1.499
SEGMENT NR	14	L = 0.999	R = 1.699
SEGMENT NR	15	L = 0.999	R = 1.899
SEGMENT NR	16	L = 0.999	R = 2.149
SEGMENT NR	17	L = 0.999	R = 1.699
SEGMENT NR	18	L = 0.999	R = 0.500
SEGMENT NR	19	L = 0.999	R = 0.349



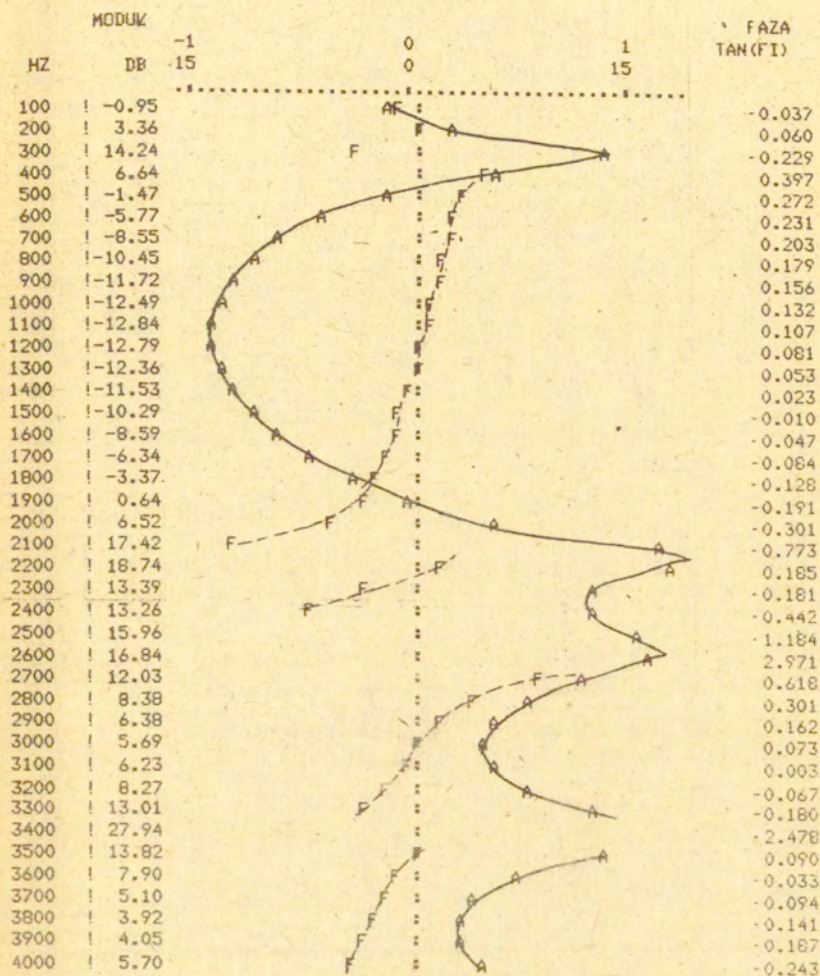
Rys.26. Przekrój artykulacyjny odpowiadający samogłosce [u]

7.3. Struktura formantowa samogłosek polskich.

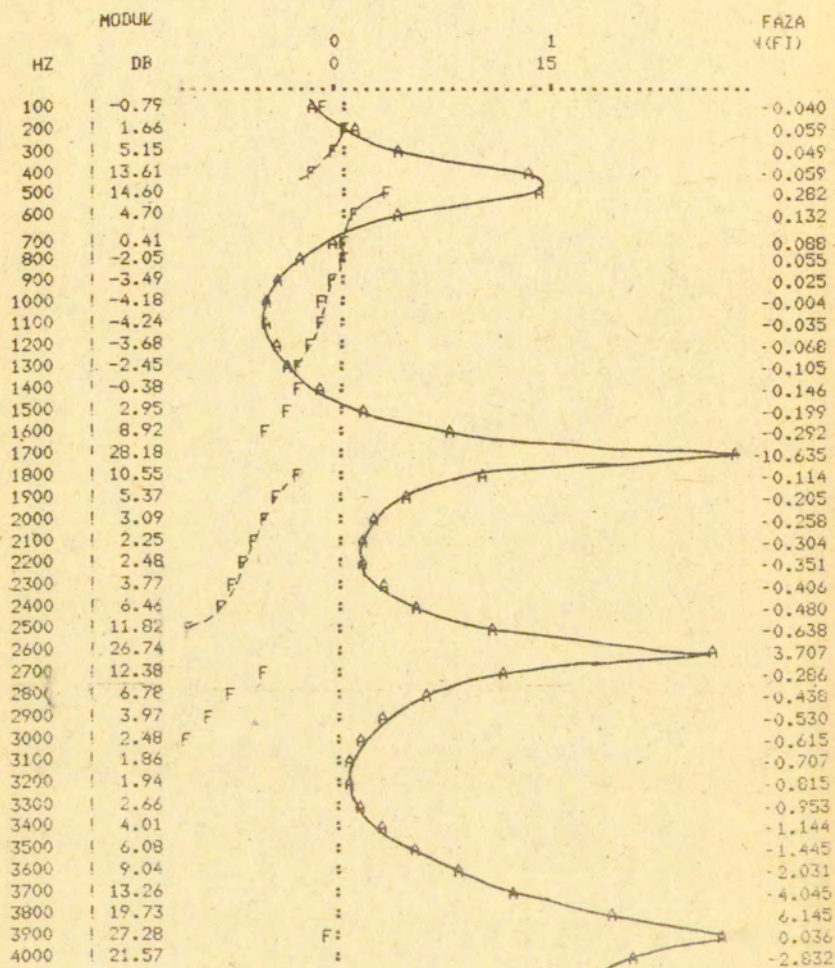
Traktując przekroje artykulacyjne samogłosek polskich, wyznaczone w rozdziale 7.2, jako dane wejściowe do programu MK 23, obliczono odpowiadające im funkcje transmitancji zadanego toru głosowego przedstawione na rys. 27-32, a następnie wyznaczono częstotliwości formantowe F1, F2 i F3 oraz odpowiadające im szerokości pasm formantowych B1, B2 i B3 tych samogłosek. Wyniki przedstawiono w tablicach 11, 12 i 13 w kolumnie A, porównując je z odpowiednimi danymi JASSEMA (kolumna B) oraz WAKITY i FANTA (kolumna C).



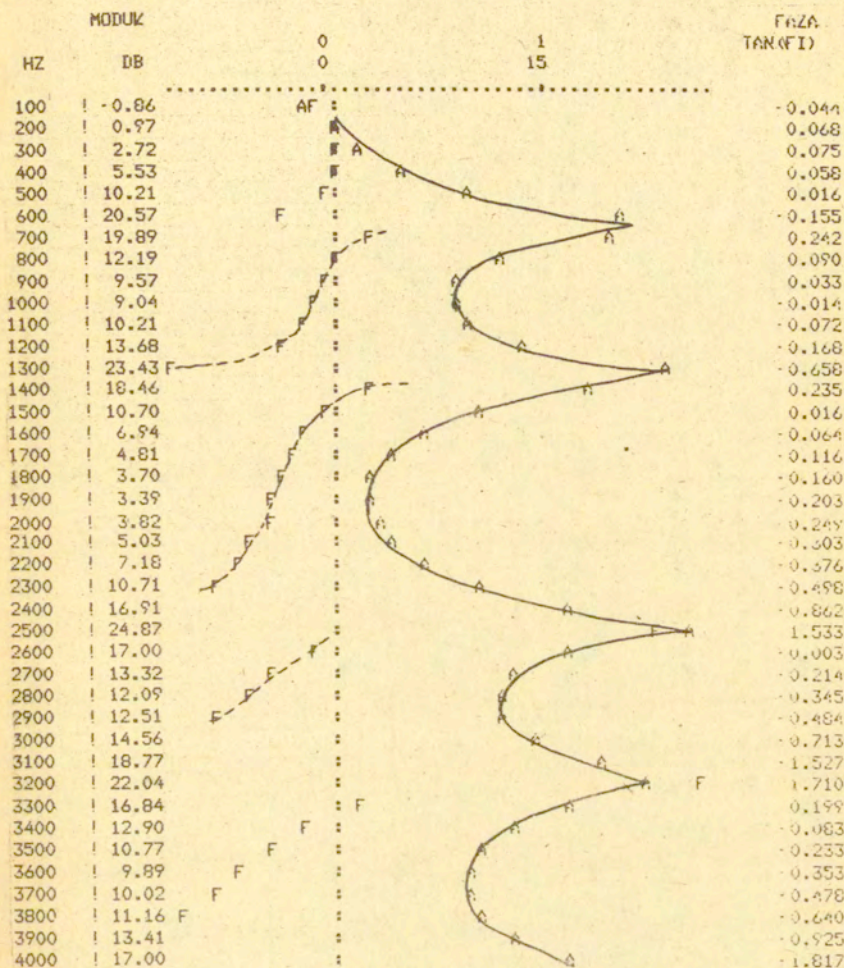
Rys.27. Przebieg modułu i fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust w funkcji częstotliwości w przypadku samogłoski [1].



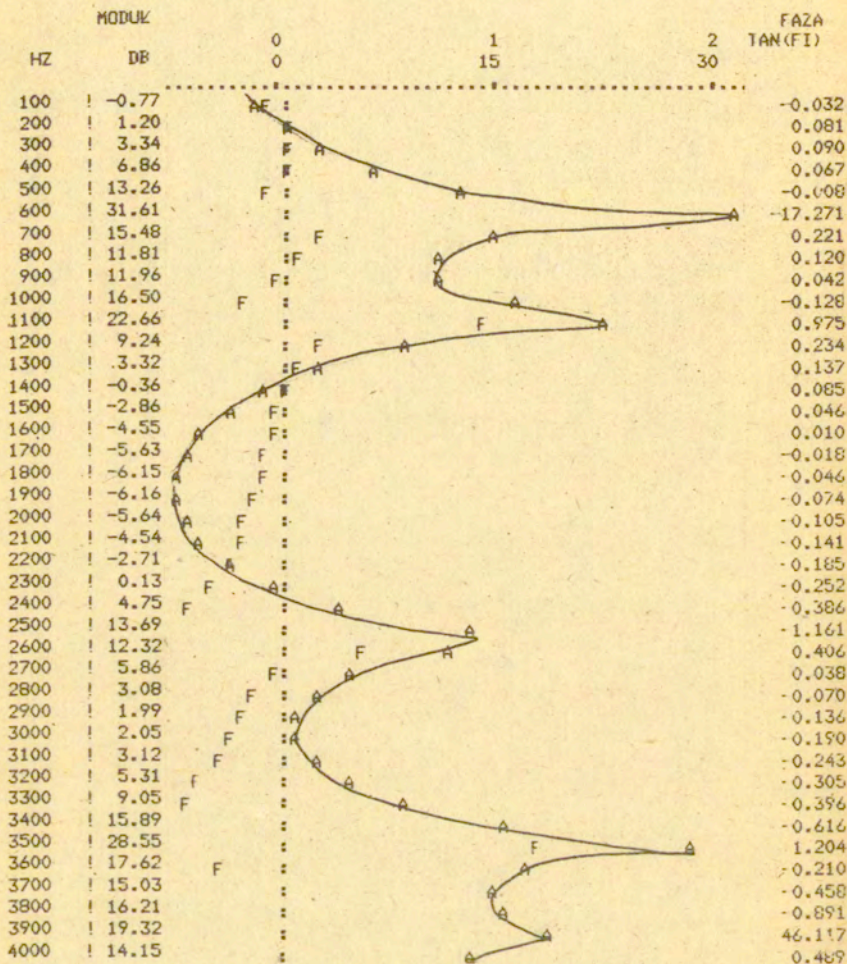
Rys.28. Przebieg modułu i fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust w funkcji częstotliwości w przypadku samogłoski [e].



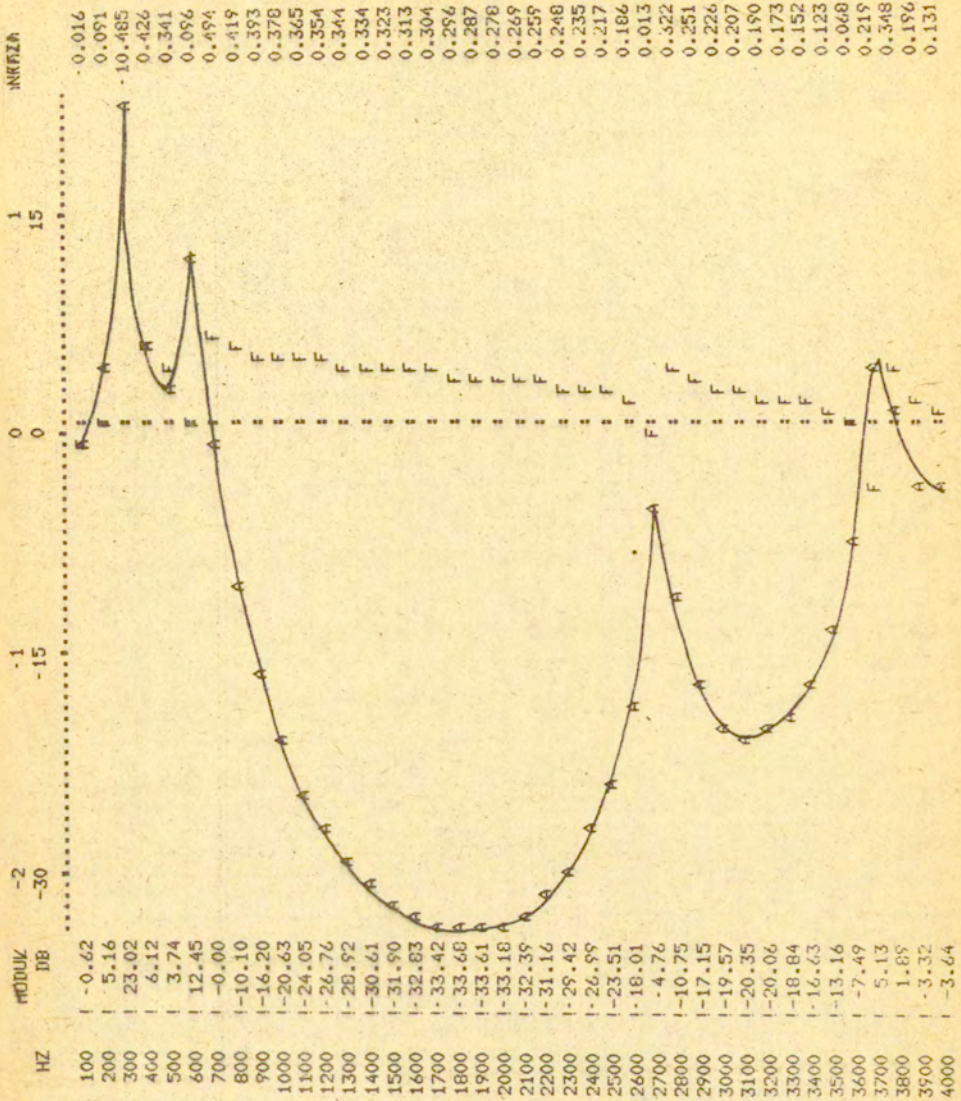
Rys.29. Przebieg modułu i fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust w funkcji częstotliwości dla samogłoski [e].



Bys.30. Przebieg modułu i fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust w funkcji częstotliwości w przypadku samogłoski [a].



Rys.31. Przebieg modułu i fazy ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości w przypadku samogłoski [o].



Rys.32. Przebieg modułu i fazy ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości w przypadku samogłoski [u].

Tablica 11. Częstotliwości formantowe F1 i szerokości pasm formantowych B1 samogłosek polskich otrzymane za pomocą modelu cyfrowego kanału głosowego (kolumna A), dane JASSEMA (kolumna B) i dane FANTA [36] (kolumna C).

SAMOGL.	F1 [Hz]			B1 [Hz]	
	A	B	C	A	C
ɔ	549		529	15	20
i	255	220	289	23	36
ɨ	320	324		21	
e	441	568	462	16	20
a	647	750	739	20	29
o	600	540	575	26	26
u	291	285	290	24	37

Tablica 12. Częstotliwości formantowe F2 i odpowiadające im szerokości pasm formantowych B2 dla samogłosek polskich (kolumna A), (kolumna B - dane JASSEMA i kolumna C - dane FANTA,

SAMOGL.	F2 [Hz]			B2 [Hz]	
	A	B	C	A	C
ɔ	1518		1475	30	41
i	2420	2400	2354	30	29
ɨ	2121	2064		41	
e	1779	1877	2011	30	65
a	1280	1268	1142	40	40
o	1070	922	894	32	30
u	621	675	636	17	24

Tablica 13. Częstotliwości formantowe F3 i szerokości pasm formantowych B3 samogłosek polskich uzyskane za pomocą modelu cyfrowego *MK 23* (kolumna A), oraz porównanie z danymi JASSEMA (kolumna B) i orientacyjnymi danymi dla samogłosek angielskich FANT [36] (kolumna C).

SAMOGL.	F3 [Hz]			B3 [Hz]	
	A	B	C	A	C
ɔ	2490		2443	80	85
i	2890	3045	2888	210	266
ɨ	2530	2679		210	
e	2650	2647	2777	95	234
a	2510	2526	2491	80	64
o	2530	2619	2428	60	32
u	2720	2580	2441	20	26

8. Podsumowanie

Celem pracy było stworzenie komputerowego modelu symulacyjnego toru głosowego, ograniczonego do jego odcinka gardłowo-ustnego. Zadaniem modelu jest odtwarzanie warunków artykulacji nienazalizowanych dźwięków mowy o pobudzeniu krtaniowym, z uwzględnieniem indywidualnych cech anatomicznych narządu mowy.

W pracy wyznaczono hipotetyczne przekroje artykulacyjne sześciu polskich samogłosek ustnych i obliczono odpowiadające im teoretyczne częstotliwości formantowe oraz szerokości pasm formantowych. Wyniki pracy stanowią punkt wyjścia do opracowania uniwersalnego modelu organu mowy, obejmującego również kanał nosowy, bocznikujący kanał gardłowo-ustny w przypadkach nazalizacji. Model symulacyjny ma służyć jako narzędzie badawcze przy rozwijaniu metod akustycznych w diagnostyce medycznej organu mowy w przypadkach patologii kanału głosowego, a w szczególności rozszczepów podniebienia, bowiem wymuszona nazalizacja wywołana rezszczepem podniebienia znajduje bezpośrednie odbicie w strukturze formantowej pierwotnie nienazalizowanych dźwięków mowy.

Bibliografia

1. BERG, van den, J., W., 1955 : Transmission of the vocal cavities. - Journ.Acoust. Soc.Amer., 27, 1, 161-168.
2. BERG, van den, J., W., ZANTEMA, J., T., DOORNENBAL, P., 1957 : - On the air resistance and Bernoulli effect of the human larynx. - Journ.Acoust. Soc.Amer., 29, 626-631.
3. BERG, van den, J., W., 1960 : - An electrical analogue of the trachea, lungs and tissues. - Acta Physiol. Pharmacol. Neederl., 9, 361-385.
4. BOGERT, B., 1953 : - On the band width of vowel formants. - Journ.Acoust. Soc.Amer., 25, 7, 791-792.
5. BOLLA, K., 1981 : - A conspectus of Russian speech sounds. - Akademia Kiade, Budapest.
6. CHIBA, T., KAJIYAMA, M., 1941 : - The vowel, its nature and structure. - Tokyo Kaiseikan Pub. Co.
7. COKER, C., H., 1968 : - Speech synthesis with a parametric articulatory model. - Proc.Kyoto Speech Symposium, Kyoto, Japan, Rpts. A-4-1, A-4-6.
8. CRANDALL, I., B., 1927 : - Dynamical study of the vowel sounds. - Bell System Techn. Journ., 6, 100-116.
9. DENNIS, J., B., 1962 : - Computer control of an analog vocal tract. - Proc. Stockholm Speech Communication Seminar, Royal Inst.Techn., Stockholm, Sweden.
10. DUNN, H., K., 1950 : - The calculation of vowel resonances and an electrical vocal tract. - Journ.Acoust. Soc.Amer., 22, 740-753.
11. DUNN, H., K., 1961 : - Methods of measuring vowel formants bandwidths. - Journ.Acoust. Soc.Amer., 33, 12, 1937-1946.
12. FANT, G., 1960 : - Acoustic theory of speech production. - Mouton and Co., s.Gravenhage.

13. FLANAGAN, J., L., LANDGRAF, L., 1968 : - Self-oscillating source for the vocal-tract synthesizers. - IEEE Trans. Audio and Electroacoust., AU-16, 57-64.
14. FLANAGAN, J., L., ISHIZAKA, K., SHIPLEY, K., L., 1975 : - Synthesis of speech from a dynamic model of the vocal cords and vocal tract. - Bell System Techn. Journ., 54, 485-506.
15. FUJIMURA, O., LINDQVIST, J., 1971 : - Sweep-tone measuring of vocal tract characteristics. - Journ. Acoust. Soc. Amer., 49, 2, 541-558.
16. GUERIN, B., 1974 : - Synthetiseur analogue du conduit vocal a comande dynamique par calculateur. - Proc. 8th Int. Congress on Acoustics, I.C.A., London.
17. HECKER, M., H., L., 1962 : - Studies of nasal consonants with an articulatory speech synthesizer. - Journ. Acoust. Soc. Amer., 34, 179-188.
18. HEINZ, J., M., 1962 : - An analysis of speech spectra in terms of a model of articulation. Proc. Stockholm Speech Communication Seminar, Royal Inst. Techn., Stockholm, Sweden.
19. ISHIZAKA, K., 1968 : - On model of the Larynx. - Journ. Acoust. Soc. Amer., 22, 293-294.
20. JASSEM, W., 1973 : Podstawy fonetyki akustycznej. - PWN, Warszawa.
21. KACPROWSKI, J., 1962 : - Teoretyczne podstawy syntezy samogłosek polskich w rezonansowych układach formantowych. - Rozprawy Elektrotechn., 8, 1, 127-203.
22. KACPROWSKI, J., 1968 : - Theoretical bases of synthesis of polish vowels in resonance circuits. - Speech analysis and synthesis. red. Jassem, W., 1, 219-287, PWN, Warszawa.
23. KACPROWSKI, J., MIKIEL, W., SZEWCZYK, A., 1976 : - Akustyczne badania modelowe rozszczepu podniebienia. - Arch. Akustyki, 11, 2, 167-187.

24. KACPROWSKI, J., 1977-a : - Fizyczne modele źródła krtaniowego. - Arch. Akustyki, 12, 1, 47-70.
25. KACPROWSKI, J., 1977-b : - Model symulacyjny kanału głosowego z uwzględnieniem zjawiska nazalizacji. - Arch. Akustyki, 12, 4, 281-302.
26. KACPROWSKI, J., 1981 : - An acoustical model of the vocal tract for the diagnostics of cleft palate. - Speech analysis and synthesis. red. Jassem, W. , 5, 165-185, PWN, Warszawa.
27. KELLY, J., L., LOCHBAUM, C., 1962 : - Speech synthesis. - Proc. Stockholm Speech Communication Seminar, Royal Inst. Techn., Stockholm, Sweden.
28. MAEDA, S., 1982 : - Adigital simulation method of the vocal tract system. γ Speech Communication, 1, 3/4, 199-229.
29. MRAYATI, M., GUERIN, B., 1976 : - Etude des caracteristiques acoustiques des voyelles orales francaises par simulation du conduit vocal avec pertes. - Revue d'Acoustique, 9, 36, 18-32.
30. MRAYATI, M., 1976 : - Contribution aux études sur la production de la parole. L' Institut National Polytechnique de Grenoble rozprawa doktorska .
31. NORD, L., FANT, G., BRANDERUD, P., 1976 : - A note on the vocal tract wall impedance. - STL - QPSR, 4, 13-20.
32. ROSEN, G., 1958 : - Dynamic analog speech synthesizer. - Journ.Acoust. Soc.Amer., 30, 201-209.
33. STEVENS, K., N., KASOWSKI, S., FANT, G., 1953 : - An electrical analog of the vocal tract. - Journ.Acoust. Soc.Amer., 25, 734-742.
34. STEVENS, K., N., HOUSE, A., S., 1955 : - Development of a quantitative description of vowel articulation. - Journ. Acoust. Soc. Amer., 27, 484-493.

35. UNGEHEUER, G., 1962 : - Elemente einer akustischen Theorie der Vokalartikulation. - Springer Verlag, Berlin - Göttingen Heidelberg.
36. WAKITA, H., FANT, G., 1978 : - Toward a better vocal tract model. - STL - QPSR, 1, 9-29.
37. WEGEL, R., L., 1930 : - Theory of vibration of the larynx. - Bell System Techn. Journ., A.9, 207-227.
38. WEBSTER, A., G., 1919 : - Acoustical impedance and theory of horns. - Proc.Nat.Acad. Sci. U.S., 5, 275-282.
39. WIERZCHOWSKA, B., 1980 : - Fonetyka i fonologia języka polskiego. - Ossolineum.

Pracę wykonano w ramach problemu węzłowego 06.9:
Podstawowe Problemy Elementów i Systemów Inżynierii
Biomedycznej.