

2.23 — fonetyka akustyczna,
analiza i synteza mowy

W. Nowakowska, P. Żarnecki

WSTĘPNE BADANIA MODELOWE
WPLYWU ZJAWISKA NAZALIZACJI
NA STRUKTURĘ WIDMOWĄ SAMOGŁOSEK

39/1984

P. 269



WARSZAWA 1984

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 16 listopada 1984 r.

56986



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 160 egz. Ark.wyd. 2,6. Ark.druk. 4,25

Oddano do drukarni w listopadzie 1984 r.

Nr zamówienia 738/84

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul.Śniadeckich 8

Wanda Nowakowska

Piotr Żarnecki

Zakład Akustyki Cybernetycznej

IPPT PAN

WSTĘPNE BADANIA MODELOWE WPŁYWU ZJAWISKA

NAZALIZACJI NA STRUKTURĘ WIDMOWĄ SAMOGŁOSEK

Streszczenie

Przedstawiono konfigurację symulacyjnego modelu toru głosowego, przeznaczonego do badań modelowych wpływu nazalizacji na strukturę formantową samogłosek, w zastosowaniu do diagnostyki medycznej wad organu mowy. W oparciu o takie narzędzie badawcze określono impedancję wejściową toru nosowego przy różnych powierzchniach przekroju poprzecznego segmentów wejściowych, jako miary stopnia sprzężenia akustycznego między kanałami. Zjawisko wpływu nazalizacji na strukturę formantową samogłosek zbadano w przypadku, gdy miejsce włączenia kanału nosowego jest stałe a zmienne są parametry sprzężenia, a także gdy stopień sprzężenia akustycznego pozostaje niezmienny, zaś zmianom ulega lokalizacja miejsca włączenia kanału nosowego.

1. Wstęp

Modelowanie toru głosowego, jako układu biologicznego, polega na odwzorowaniu w układach fizycznych jego struktury anatomicznej, zwłaszcza konfiguracji geometrycznej w trakcie artykulacji dźwięków mowy, z możliwością uwzględnienia cech osobniczych organu mowy. Tworzenie modelu symulacyjnego rozpoczęto od opracowania modelu analogowego o założonej geometrii obu torów, nosowego i gardłowo-ustnego i przedstawienia ich w postaci sieci elementarnych układów fizycznych, tzn. akustycznych

lub elektrycznych, których właściwości i charakterystyki są określone poprzez przyjęty system analogii elektroakustycznych.

Symulacyjny model toru gardłowo-ustnego opracowany w poprzednich latach [Nowakowska (1983)] pozwolił na badanie struktury formantowej samogłosek polskich tzn. na wyznaczenie ich częstotliwości formantowych i szerokości pasm formantowych. Dołączenie do istniejącego modelu odcinka gardłowo-nosowego stworzyło możliwość badania wpływu zjawiska nazalizacji na strukturę formantową samogłosek polskich.

Zjawisko wymuszonej nazalizacji ma miejsce w przypadku rozszczepu podniebienia, jako wady rozwojowej narządu głosu, czego bezpośrednim efektem jest trwałe i niekontrolowane sprzężenie akustyczne między kanałem gardłowo-ustnym i nosowym, powodujące nazalizację pierwotnie nienosowych dźwięków mowy. W jednej z wcześniejszych prac Zakładu wyznaczono analitycznie i zbadano doświadczalnie na modelu analogowym wpływ nazalizacji wywołanej rozszczepem podniebienia miękkiego na strukturę widmową samogłoski neutralnej] [Kacprowski i inni (1976)]. Stwierdzono wymierne zmiany struktury formantowej, zależne od lokalizacji i rozległości rozszczepu, co stworzyło realne możliwości opracowania obiektywnej metody diagnostyki medycznej, opartej na analizie widmowej sygnału mowy. Niezbędnym narzędziem badawczym służącym do tego celu jest model symulacyjny toru głosowego gardłowo-ustno-nosowego, który odtwarzałaby strukturę anatomiczną organu mowy w dowolnych warunkach artykulacji, z uwzględnieniem zróżnicowań osobniczych w stanach fizjologicznych i patologicznych. Model taki powstał przez rozszerzenie opracowanego poprzednio symulacyjnego modelu toru głosowego

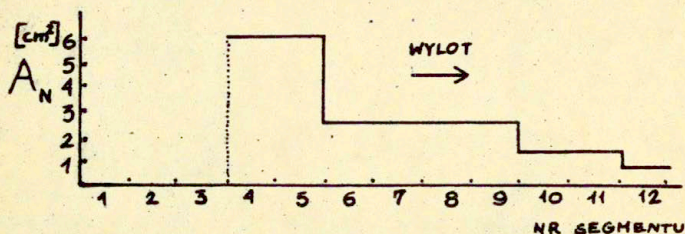
gardłowo-ustnego dzięki dołączeniu dodatkowego układu akustycznego.

2. Konfiguracja toru nosowego i odpowiadający mu układ zastępczy.

Tor nosowy składa się z wnęki noso-gardła i dwóch równoległych kanałów długości ok. 7-8 cm, rozdzielonych przegrodą z tkanki chrzęstnej. Wyznaczenie przekrojów poprzecznych tego toru potrzebne do utworzenia modelowego układu zastępczego wymaga stosowania trudno dostępnych środków technicznych jak np. tomografia komputerowa, co jest praktycznie trudne do zrealizowania. Ponieważ jednak konfiguracja geometryczna toru nosowego jest stała, i nie zależy od warunków artykulacji a wykazuje jedynie zróżnicowania osobnicze, stosuje się więc daleko idące uproszczenia funkcji kształtu powierzchni przekrojów poprzecznych toru, traktując równoległe odcinki kanałów nosowych jako rurę o przekroju równym sumie ich przekrojów, a nieregularne kształty przekrojów poprzecznych aproksymując przekrojem kołowym. Serie pomiarów przekroju kanału nosowego zostały wykonane przez [House i Stevens'a (1955)], [Heckera (1961)], [Bjuggrena i Fanta (1964)] i innych.

Wykorzystując dane dostępne w literaturze przedmiotu, w obecnej pracy akustyczny model toru nosowego przedstawiono w postaci kaskadowego połączenia dwunastu odcinków rur cylindrycznych o jednakowych długościach $l_i = 1 \text{ cm} = \text{const}$ i o przekrojach A_{ni} ($i=1,2,3,\dots,12$), określonych funkcją powierzchni A_n przedstawioną na rys.1, która odpowiada konfiguracji geometrycznej

toru w przeciętnych warunkach anatomicznych dorosłego mężczyzny.



Rys.1 Funkcja powierzchni A_{ni} przekroju toru nosowego.

Trzy pierwsze segmenty ($i=1,2,3$) przedstawiające połączenie kanału ustno-gardłowego z nosowym mają zmienną powierzchnię przekroju poprzecznego, która określa stopień nazalizacji.

Podobnie jak w przypadku toru gardłowo-ustnego opisanego w poprzedniej pracy [Nowakowska (1983)], tor nosowy przedstawiono w postaci łańcucha dwunastu elementarnych czwórników typu T, reprezentujących kolejne segmenty toru o określonych parametrach fizycznych (rys.2). Ostatni odcinek toru $n=12$ jest obciążony impedancją promieniowania nosa, aproksymowaną funkcją promieniowania tłoka umieszczonego w nieskończonej płaskiej odgradzie. Po kolejnych przekształceniach i po podstawieniu wielkości fizycznych opisujących ośrodek wyrażenie określające impedancję promieniowania nosa przybiera postać (1) i (2), i w takiej formie występuje w programie symulacyjnym.

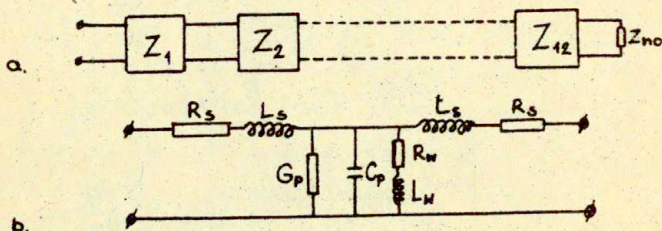
$$(1) Z_{pn} = 3.8 \cdot 10^{-11} f^3 + 4.04 \cdot 10^{-7} f^2 + j 9.68 \cdot 10^{-4} \frac{f}{R}$$

$$f \leq 1600 \text{ Hz}$$

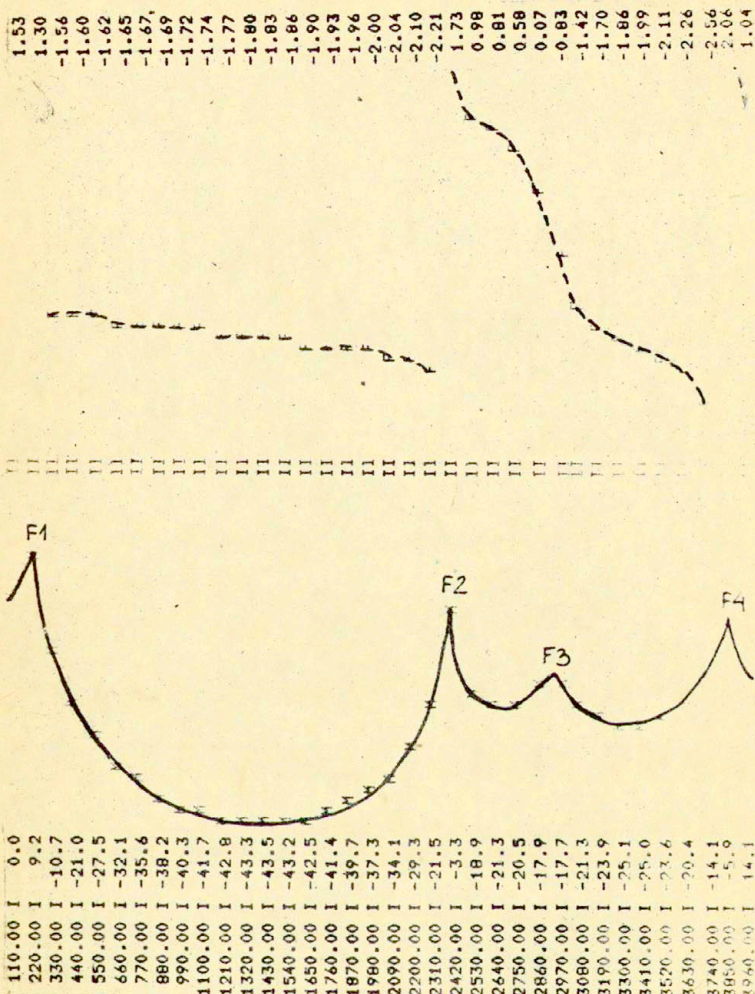
$$(2) \quad Z_{pn} = 1.01 \cdot 10^{-7} f^2 + j 9.68 \cdot 10^{-4} \frac{f}{R} \quad ; \quad f > 1600 \text{ Hz}$$

Promień otworu wylotowego nosa R jest równy promieniowi ostatniego segmentu toru i wynosi 0.27 cm.

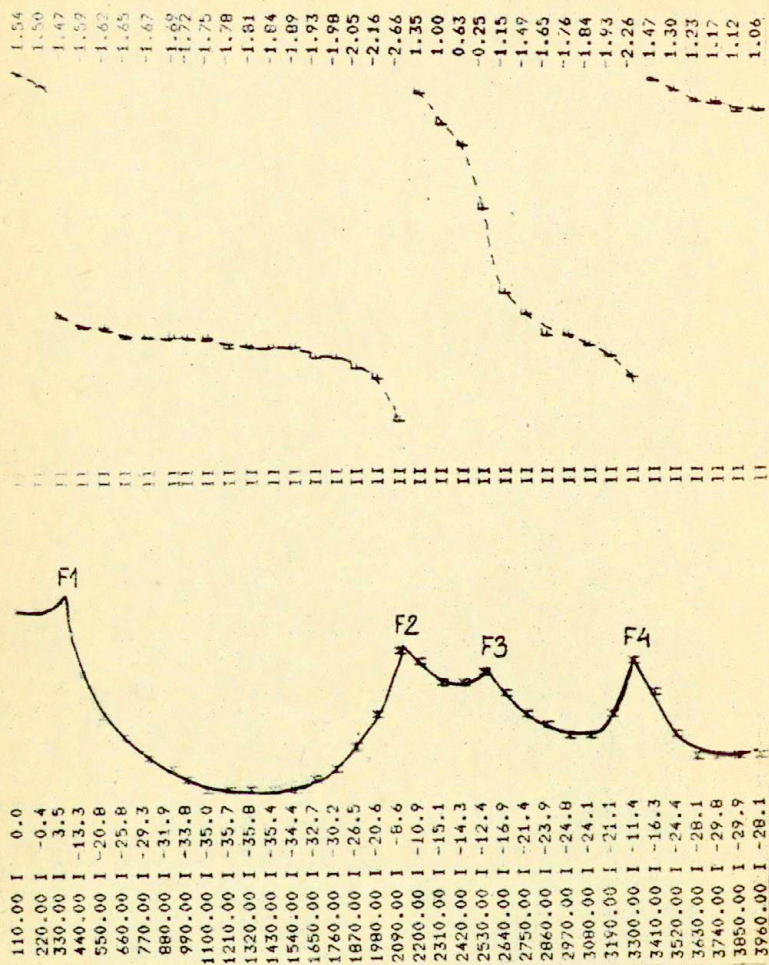
Wielkości R_w i L_w określają elementy stratnościowe drgające ścian kanału nosowego, które nie są idealnie sztywne lecz posiadają skończoną impedancję powierzchniową o charakterze bezwładnościowym. Wielkości te należą do parametrów opisujących każdy elementarny segment. Wartości liczbowe odpowiadające R_w i L_w na jednostkę powierzchni zostały wyznaczone metodą iteracyjną według kryterium zgodności charakterystyk częstotliwościowych pod względem rozkładu biegunów i szerokości pasm rezonansowych z danymi uzyskanymi wówczas, gdy wielkości opisujące impedancję ścian uwzględniono jako skupione na wejściu i wyjściu toru głosowego. Wyznaczone dane liczbowe wielkości opisujących impedancję ścian wynoszą odpowiednio $R_w = 2.5 [\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \text{cm}^{-4}]$ i $L_w = 0.043 [\text{g} \cdot \text{cm}^{-4}]$. Przebiegi ciśnienia akustycznego u wylotu ust w funkcji częstotliwości dla samogłosek polskich i dla wyznaczonych wartości R_w i L_w zawartych w każdym segmencie toru przedstawiono na rys. 3 - 8. Przebiegi przedstawiono przede wszystkim w celu porównania z odpowiadającymi przebiegami zamieszczonymi w poprzedniej pracy, gdzie elementy R_w i L_w występują na wejściu i wyjściu toru [Nowakowska (1983)]. Wprowadzona zmiana w opisie pojedynczego segmentu toru nie spowodowała zmian w widmie badanych samogłosek umożliwiła natomiast skonstruowanie układu zastępczego rozgałęzienia torów gardłowo-ustnego i nosowego.



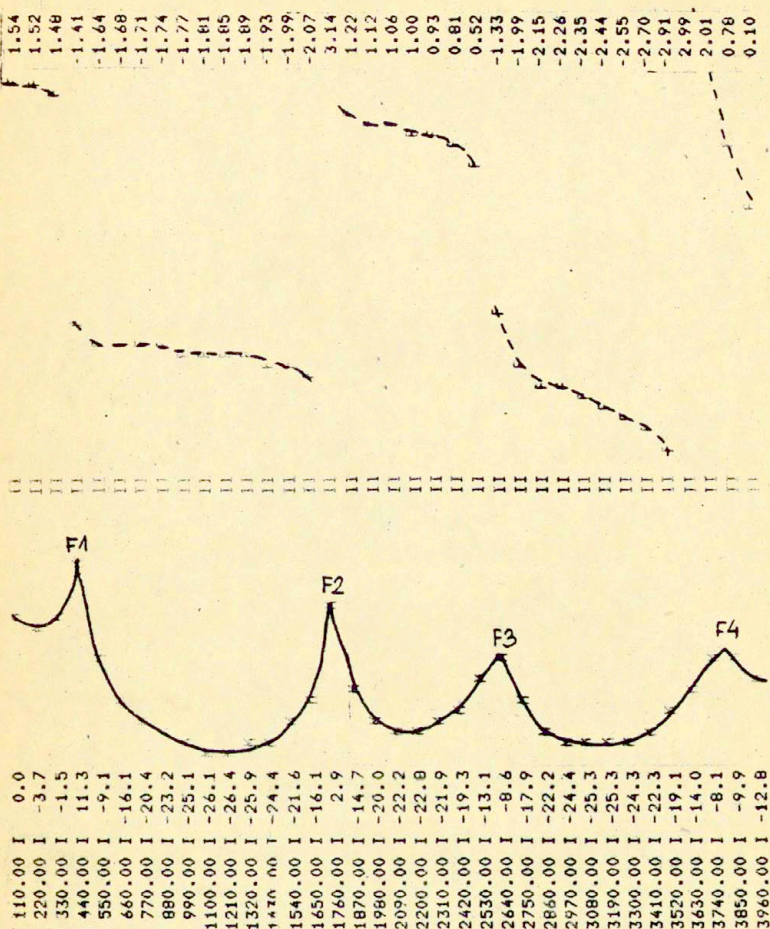
Rys.2(a) Elektryczny schemat zastępczy kanału nosowego w oparciu o jego model akustyczny, (b) czwórnik typu T reprezentujący pojedynczy segment modelu, gdzie : L_s - masa akustyczna powietrza w rurze, G_p - podatność akustyczna powietrza w rurze, R_s - akustyczna rezystancja strat wskutek wiskotycznego tarcia powietrza przy ściankach rury, G_p - akustyczna konduktancja strat wskutek przewodnictwa cieplnego, R_w i L_w elementy stratnościowe drgające ścian rury.



Rys.3 Przebieg modułu i fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust w funkcji częstotliwości dla samogłoski [i], w przypadku gdy elementy R_w i L_w zawarte są w każdym segmencie $F1 = 202$ Hz, $F2 = 2423$ Hz, $F3 = 2900$ Hz.

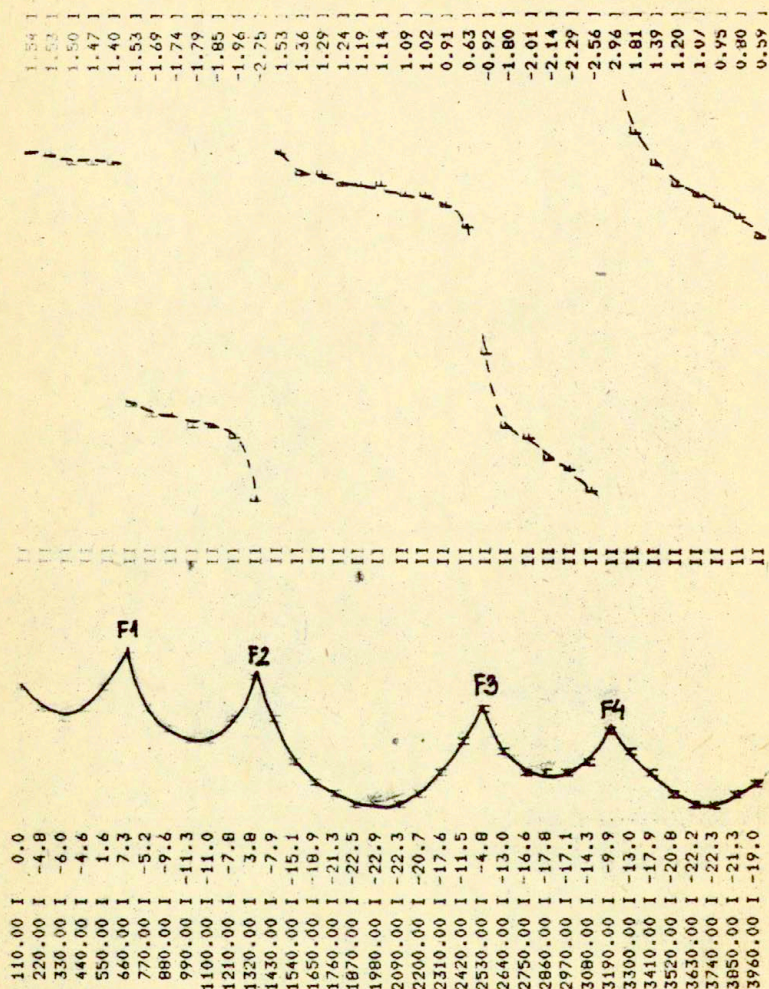


Rys.4 Przebieg modułu i fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust w funkcji częstotliwości dla samogłoski [t], w przypadku R_w i L_w w każdym segmencie toru.
 $F1 = 299$ Hz, $F2 = 2118$ Hz, $F3 = 2520$ Hz



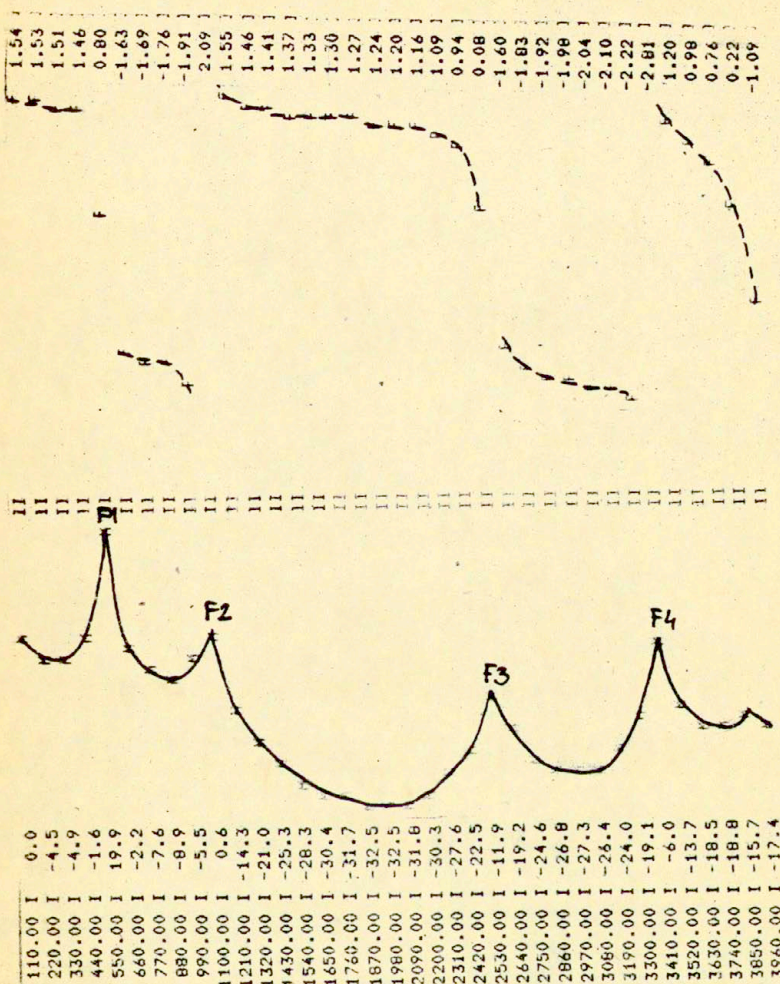
Rys.5 Przebieg modułu i fazy ciśnienia akustycznego u wy-
lotu ust dla samogłoski [e], w przypadku gdy R_w i L_w
zawarte są w każdym segmencie toru.

$F_1 = 428$ Hz, $F_2 = 1761$ Hz, $F_3 = 2625$ Hz



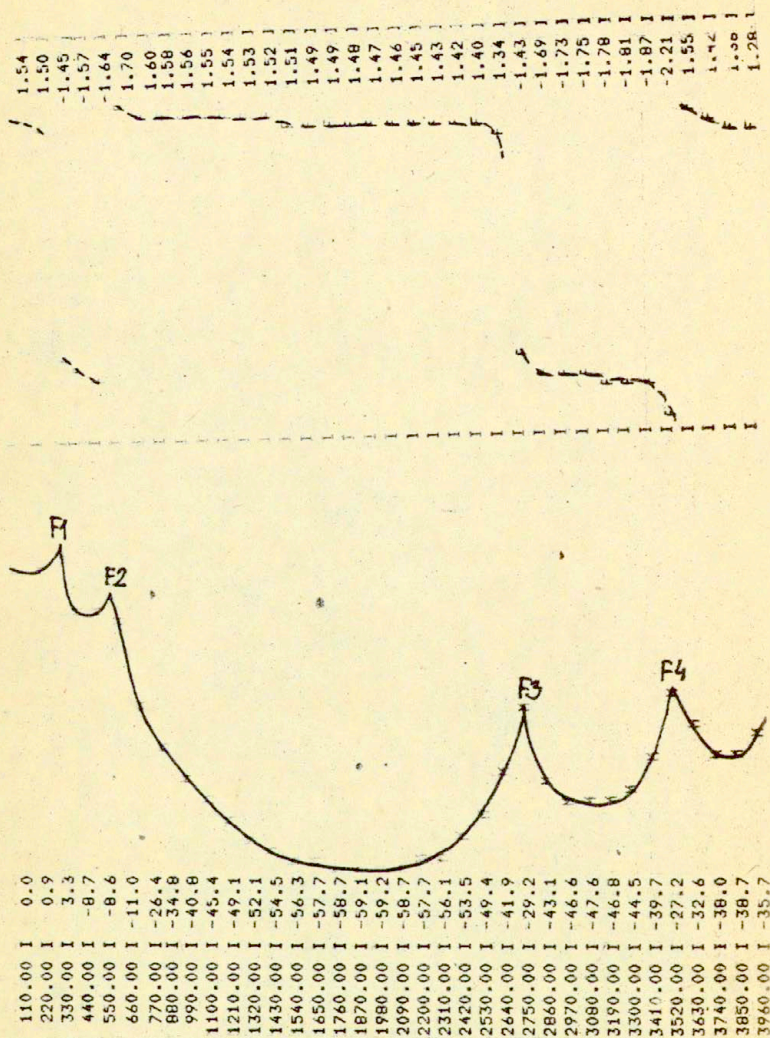
Rys.6 Przebieg modułu i fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust dla samogłoski [a], w przypadku gdy R_w i L_w zawarte są w każdym segmencie toru.

F1 = 642 Hz, F2 = 1300 Hz, F3 = 2525 Hz



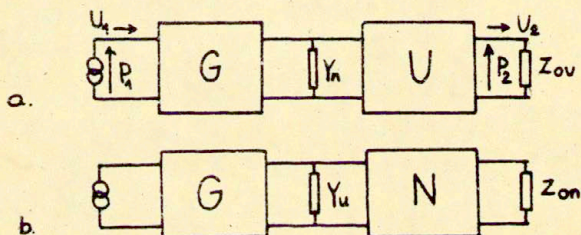
Rys.7 Przebieg modułu i fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust dla samogłoski [o], w przypadku gdy R_w i L_w zawarte są w każdym segmencie toru.

F1 = 549 Hz, F2 = 1079 Hz, F3 = 2481 Hz



Rys.8 Przebieg modułu i fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust dla samogłoski [u], gdy R_w i L_w są w każdym segmencie. $F1 = 303$ Hz, $F2 = 609$ Hz, $F3 = 2747$ Hz.

Obliczanie widma sygnału akustycznego u wylotu toru głosowego gardłowo-ustno-nosowego $[G+U+N]$ w warunkach nazalizacji spowodowanej rozszczepem podniebienia polega na obliczaniu wartości ciśnienia akustycznego P_2 na wyjściu toru w dwóch przypadkach: (a) z włączoną w punkcie rozgałęzienia admitancją wejściową Y_n toru nosowego bocznikującego tor gardłowo-ustny $[G+U]$ (rys. 9a) oraz (b) z włączoną w punkcie rozgałęzienia admitancją wejściową Y_u toru ustnego bocznikującego tor gardłowo-nosowy $[G+N]$ (rys. 9b), a następnie na wektorowym sumowaniu sygnałów wyjściowych obu torów, na zasadzie superpozycji ciśnień akustycznych fal głosowych emitowanych przez otwory ust i nosa.



Rys.9 Uproszczone schematy zastępcze toru gardłowo-ustnego $[G+U]$ z uwzględnieniem admitancji wejściowej toru nosowego Y_n oraz toru gardłowo-nosowego $[G+N]$ z uwzględnieniem admitancji wejściowej toru ustnego Y_u .

3. Symulacyjny model toru głosowego.

Opracowany model symulacyjny służy do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych (widmowych) ciśnienia akustycznego u wylotu ust i nosa oraz ich sumy, przy zadanej konfiguracji artykulacyjnej toru gardłowo-ustnego oraz przyjętej za niezmienną, konfiguracji toru nosowego. Problem modelowania w domenie częstotliwości wymaga obliczenia funkcji transmitancji T , wyrażonej stosunkiem prędkości objętościowych U_2 / U_1 , odpowiednio na wyjściu i wejściu toru, a także uwzględnienia charakterystyki częstotliwościowej źródła krtaniowego oraz uwzględnienia impedancji promieniowania z otworów ust i nosa.

W algorytmie obliczeniowym każdy pojedynczy segment zarówno toru gardłowo-ustnego jak i nosowego opisywany jest dwoma parametrami - długością segmentu l [cm] oraz promieniem jego przekroju poprzecznego R [cm]. Wprowadzenie do programu obliczeniowego tych dwóch liczb dla każdego segmentu pozwala obliczyć macierz łańcuchową każdego odcinka toru. Podanie miejsca rozgałęzienia się torów nosowego i ustnego poprzez podanie nr segmentu którym następuje rozgałęzienie, prowadzi do podziału torów na trzy części - gardłową, ustną i nosową. Sygnał wyjściowy z otworów ust czy nosa obliczany jest przy uwzględnianiu bocznikującego wpływu toru dopełniającego, przy czym bocznik ten występuje w postaci admitancji wejściowej odpowiedniego toru w miejscu rozgałęzienia. Sygnał całkowity obliczany jest przez sumowanie wektorowe sygnałów wyjściowych z ust i nosa.

Po wprowadzeniu do programu konfiguracji układu artykula-

cyjnego podaje się zakres częstotliwości, w którym ma być obliczona charakterystyka częstotliwościowa układu. Przyjęto na ogół za częstotliwość podstawową 110 Hz i obliczenia prowadzi się dla częstotliwości harmonicznych pobudzenia. W celu umożliwienia porównywania otrzymanych wyników wartości amplitud normuje się w skali logarytmicznej do wartości sumy sygnałów z otworów ust i nosa obliczonej dla $F_0=110$ Hz.

Dla ułatwienia badań modelowych konstrukcja programu pozwala na wprowadzenie pojedynczych korekt do zadanej konfiguracji toru. Ponadto możliwe jest dość precyzyjne badanie wąskich fragmentów widma, wykorzystywane zwłaszcza przy wyznaczaniu częstotliwości formantowych i odpowiadających im szerokości pasm. Prowadzący eksperymenty modelowe otrzymuje na wydruku z komputera dokładne wymiary geometryczne toru nosowego i gardłowo-ustnego dla danego cyklu symulacji.

Obliczane charakterystyki częstotliwościowe sygnału u wylotu ust i nosa oraz ich suma mają charakter zespolonych funkcji częstotliwości. Na wydruku podaje się osobno wartości modułu i fazy tych sygnałów w formie oddzielnych wykresów. Równoległe z przebiegiem widma drukowane są wartości liczbowe częstotliwości oraz obliczone wartości badanych funkcji.

4. Wyznaczanie impedancji wejściowej toru nosowego.

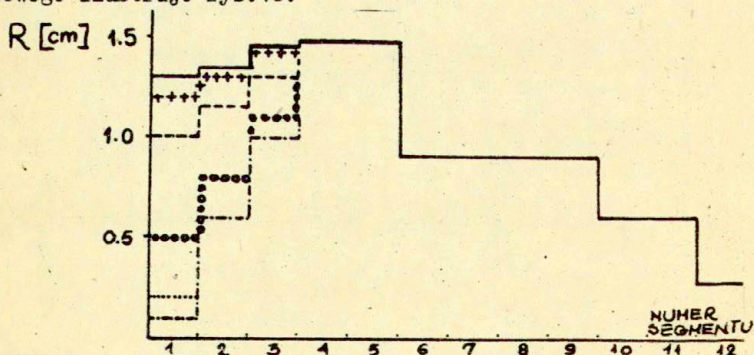
Impedancję wejściową Z_{we} w punkcie rozgałęzienia torów nosowego i gardłowo-ustnego, przy założonej powierzchni wlotu kanału nosowego $A_{n1,2,3}$ obliczano według wzoru:

$$(3) \quad Z_{we} = \frac{A_{11} P_2 + A_{12} U_2}{A_{21} P_2 + A_{22} U_2}$$

gdzie: A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} - elementy macierzy łańcuchowej dla kaskadowego połączenia segmentów toru.

P_1 , P_2 , U_1 , U_2 - ciśnienie akustyczne i prędkość objętościowa odpowiednio na wejściu i wyjściu toru.

Obliczenia impedancji wejściowej toru nosowego wykonywano w przypadku, gdy miejsce podłączenia kanału nosowego jest stałe, mianowicie między 7-8 segmentem toru gardłowo-ustnego. Promienie przekrojów poprzecznych trzech pierwszych segmentów dobierano tak, aby geometria tej części toru nosowego miała kształt lejkowaty. Stosowane w obliczeniach wymiary wlotu do kanału nosowego ilustruje rys.10.



Rys.10 Różne geometrie wlotu do kanału nosowego.

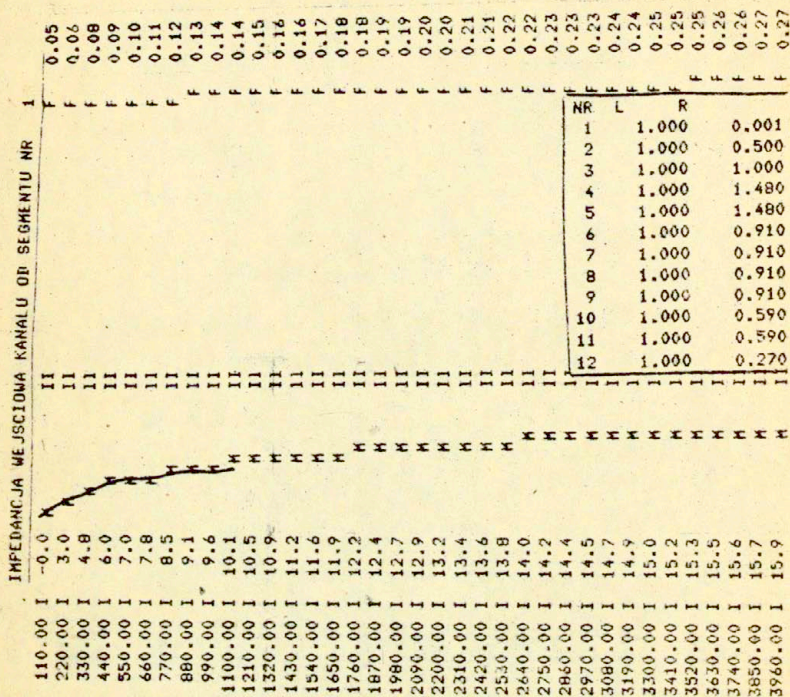
Obliczone przebiegi impedancji wejściowych toru nosowego w funkcji częstotliwości dla różnych wariantów geometrii wlotu tego toru przedstawiają rys. 11-20.

Przy zwiększaniu otworu wlotowego przebieg impedancji wejściowej jako funkcji częstotliwości zaczyna wykazywać charakterystyczne maksima i minima mające charakter rezonansu ciśnienia i prędkości w rurze stratnej. W przebadanych przypadkach maksima funkcji impedancji pojawiają się przy częstotliwości ok. 500 Hz dla $R_1 = 0.1$ cm, drugie maksimum przy częstotliwości ok. 2300 Hz dla $R_1 = 0.2$ cm, a trzecie maksimum przy 4200 Hz dla $R_1 = 0.5$ cm. W przypadku pełnego sprzężenia akustycznego charakterystyka impedancji wejściowej ma postać naprzemiennych biegunów i zer, przy czym skoki fazy są charakterystyczne jak dla układów rezonansowych.

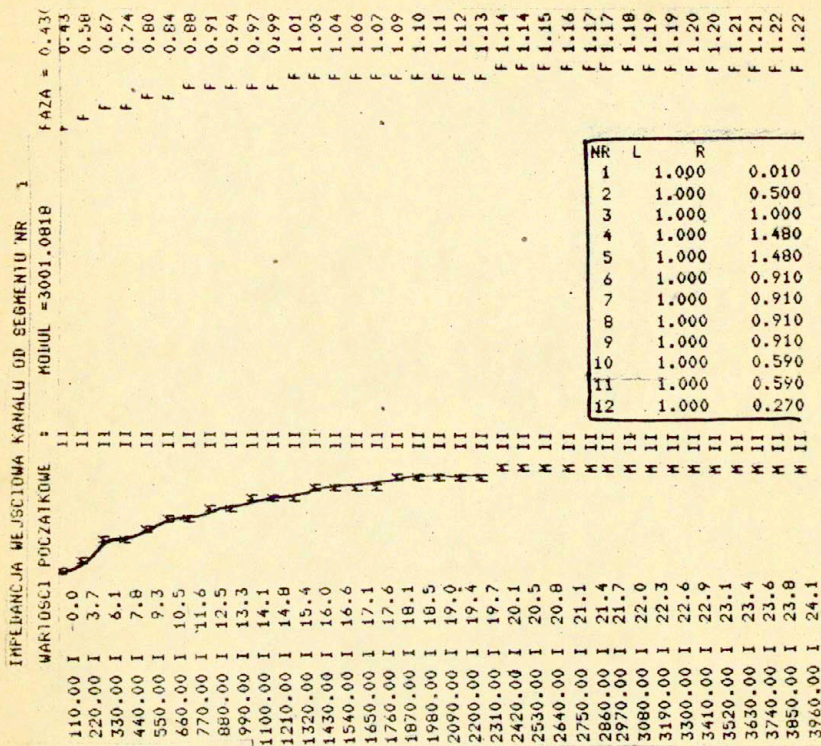
W oparciu o tę analizę wybrano sześć z przebadanych konfiguracji wlotu kanału nosowego, które służą jako wzorcowe w dalszych analizach, zwłaszcza wykorzystane przy badaniu wpływu nazalizacji wielkości sprzężenia akustycznego na strukturę widmową samogłosek.

Tablica 1. Wybrane konfiguracje wlotu toru nosowego wykorzystywane w dalszych badaniach modelowych.

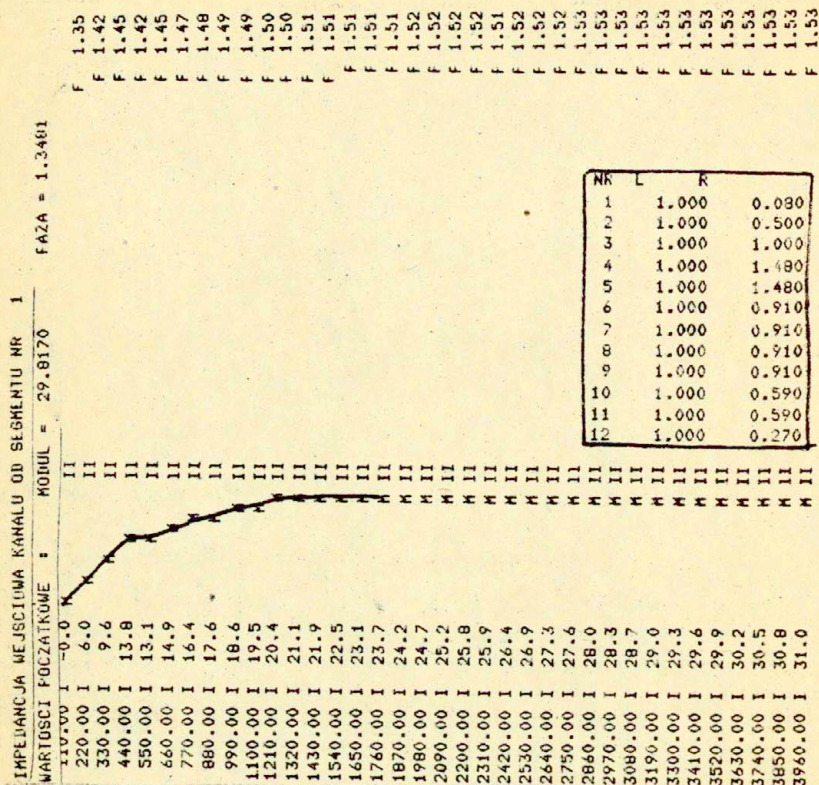
lp	R_1 [cm]	R_2 [cm]	R_3 [cm]
1	0.1	0.6	1.0
2	0.2	0.8	1.0
3	0.5	0.8	1.1
4	1.0	1.15	1.3
5	1.2	1.3	1.4
6	1.4	1.42	1.44



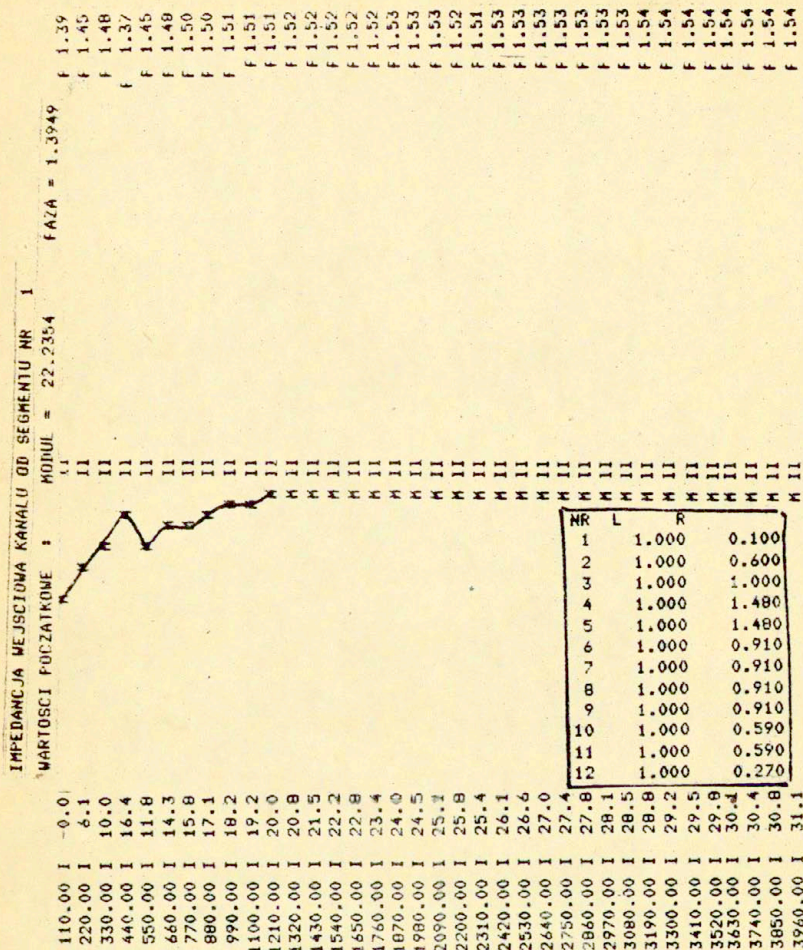
Rys.11 Przebieg funkcji impedancji wejściowej toru nosowego, w przypadku gdy promienie wlotu wynoszą : $R_1 = 0.001$ [cm] $R_2 = 0.5$ [cm] i $R_3 = 1.0$ [cm]. Dane w ramce opisują konfigurację toru nosowego.



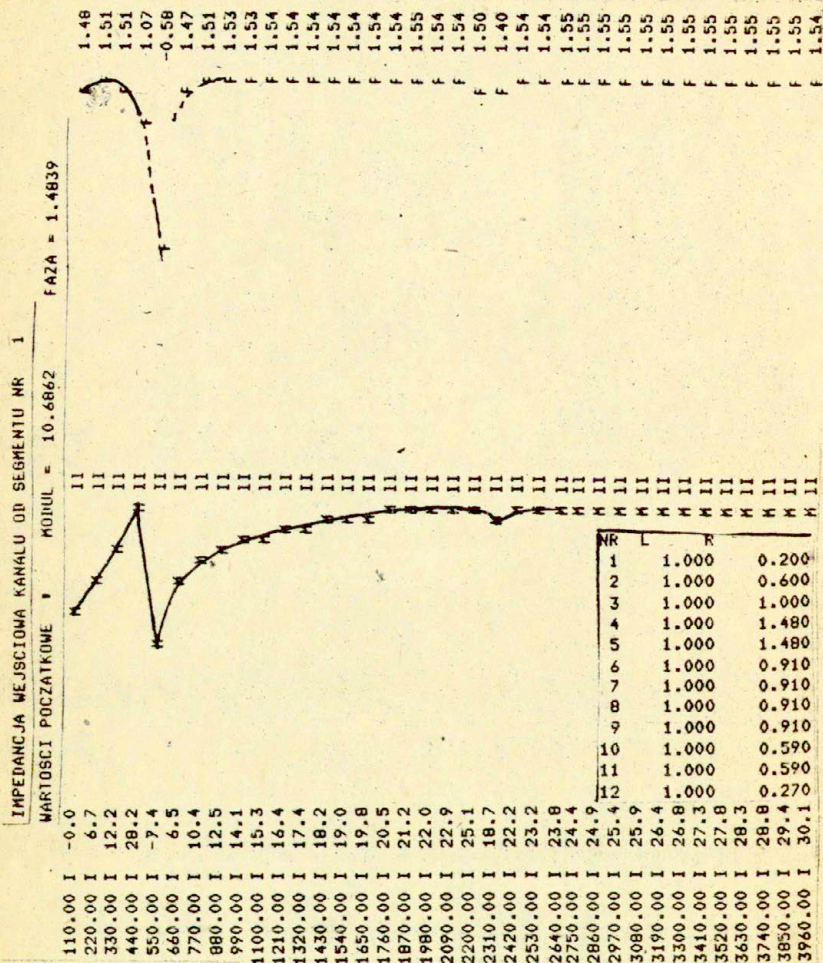
Rys. 12. Przebieg funkcji impedancji wejściowej toru nosowego w przypadku gdy promienie wlotu wynoszą: $R_1=0.01$ [cm], $R_2= 0.5$ [cm], $R_3= 1.0$ [cm]. Dane w ramce określają konfigurację toru nosowego.



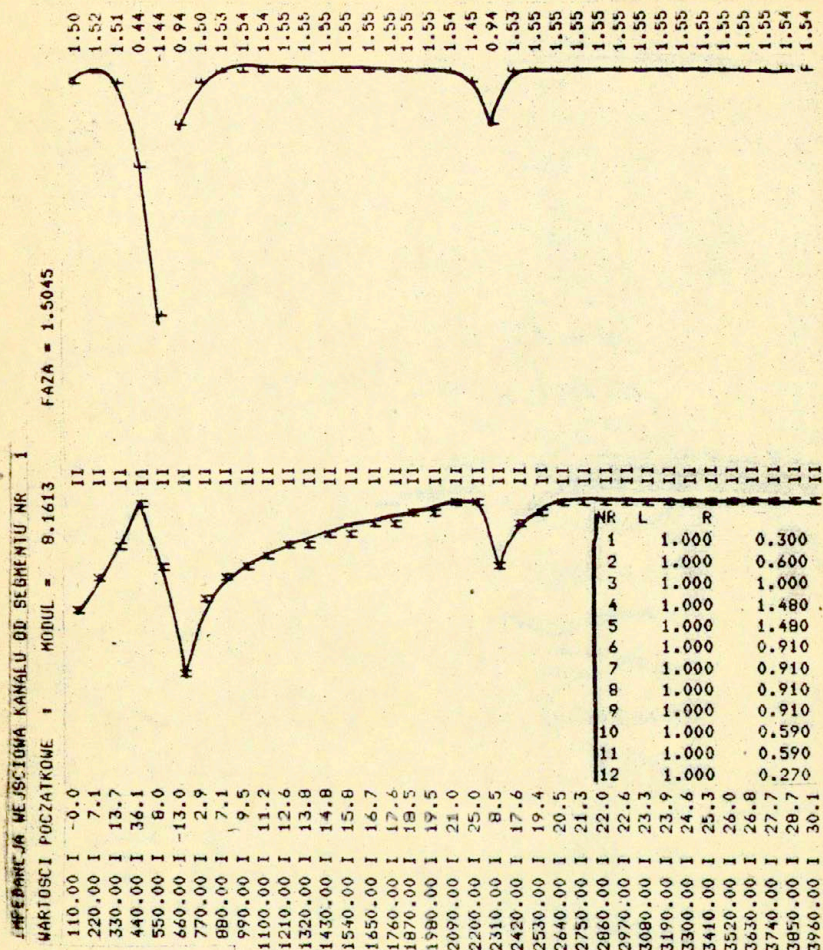
Rys.13 Przebieg funkcji impedancji wejściowej toru nosowego gdy promienie wlotu wynoszą $R_1=0.08$ [cm], $R_2= 0.5$ [cm], $R_3= 1.0$ [cm]. Dane w ramce wyznaczają przekroje toru nosowego.



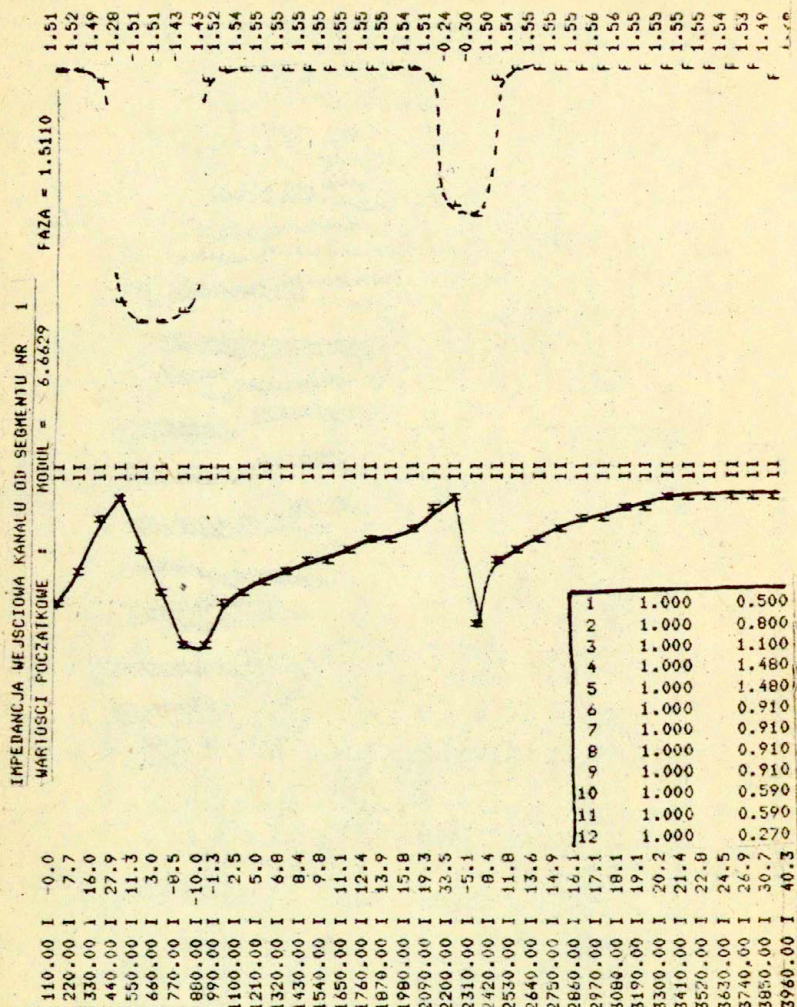
Rys.14 przebieg funkcji impedancji wejściowej w przypadku gdy promienie wlotu wynoszą $R_1 = 0.1$ [cm], $R_2 = 0.6$ [cm], $R_3 = 1.0$ [cm]. Dane w ramce określają konfigurację toru nosowego.



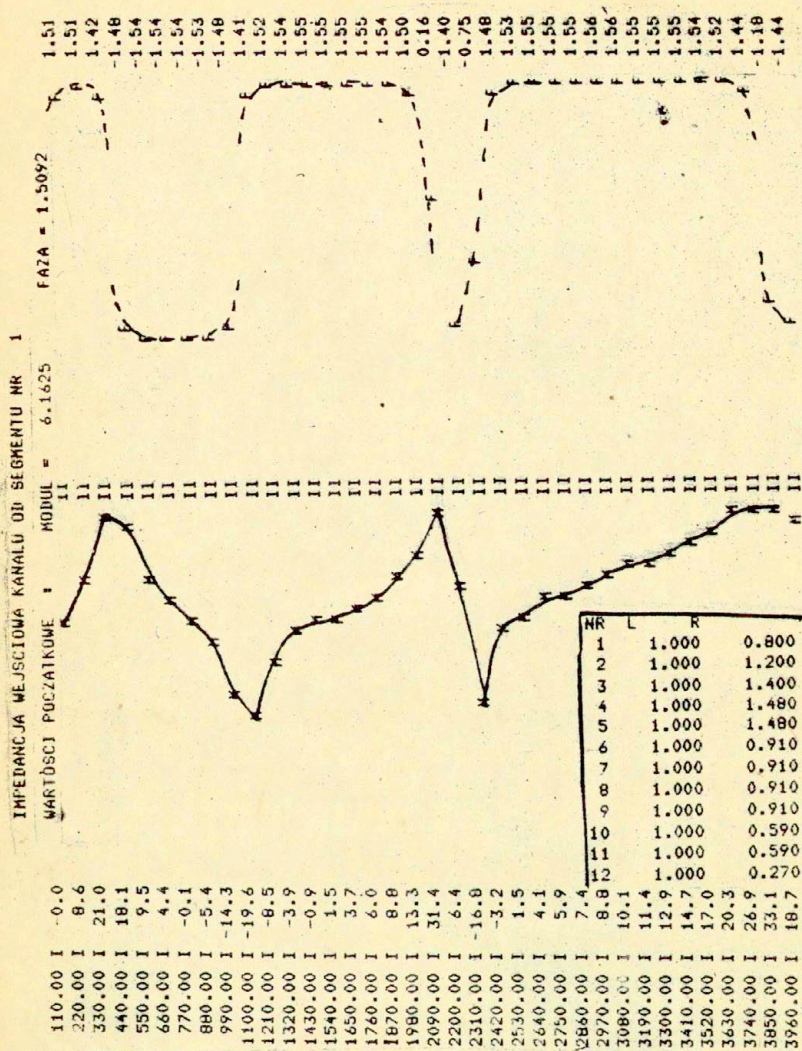
Rys.15 Przebieg funkcji impedancji wejściowej toru nosowego, w przypadku gdy promienie wlotu wynoszą: $R_1=0.2$ [cm], $R_2=0.6$ [cm], $R_3=1.0$ [cm]. Dane w ramce odpowiadają konfiguracji nosa.



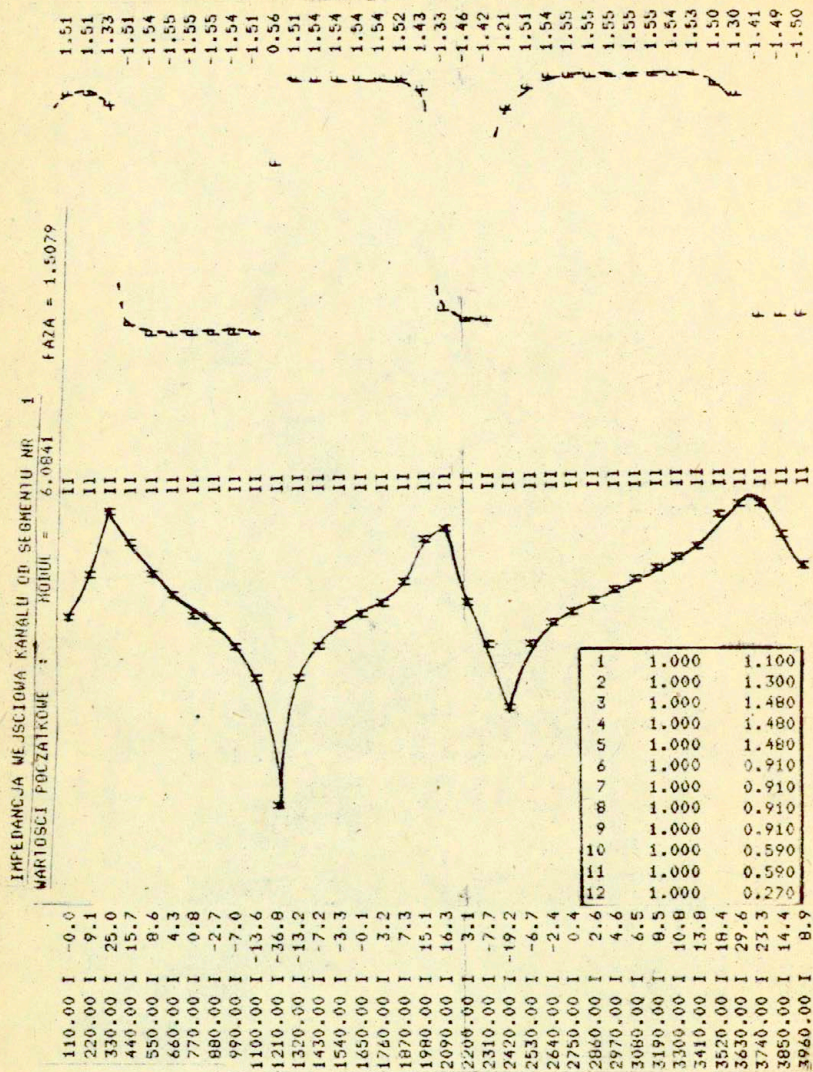
Rys.16 Przebieg funkcji impedancji wejściowej toru nosowego w przypadku gdy, $R_1=0.3$ [cm], $R_2=0.6$ [cm], $R_3=1.0$ [cm].
Dane w ramce - konfiguracja toru nosowego.



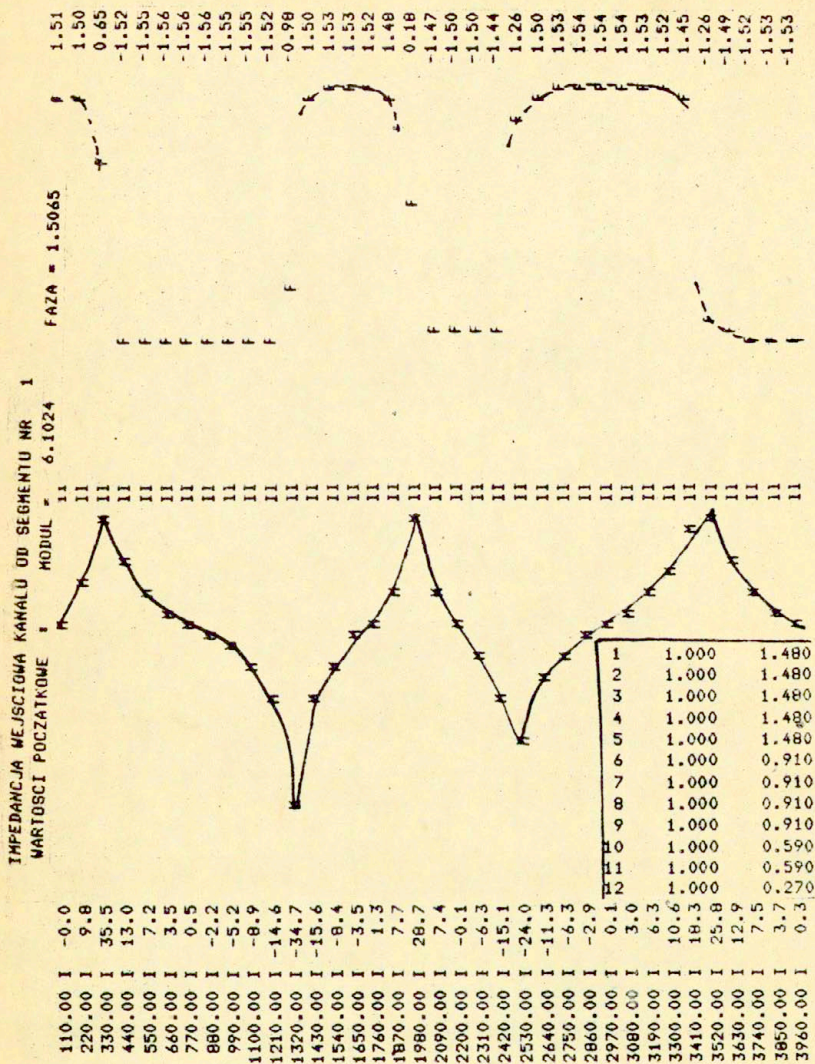
Rys.17 Przebieg funkcji impedancji wejściowej toru nosowego, gdy promienie wlotu wynoszą: $R_1=0.5$ [cm], $R_2=0.8$ [cm], $R_3=1.1$ [cm]. Dane w ramce - konfiguracja toru nosowego.



Rys.18 Przebieg funkcji impedancji wejściowej toru nosowego w przypadku gdy promienie wlotu wynoszą: $R_1=0.8$ [cm], $R_2=1.2$ [cm], $R_3=1.4$ [cm]. Dane w ramce - konfiguracja toru nosowego.



Rys.19 Przebieg funkcji impedancji wejściowej toru nosowe-
 go, gdy $R_1=1.1$ [cm], $R_2=1.3$ [cm], $R_3=1.48$ [cm].



Rys. 20 Przebieg funkcji impedancji wejściowej toru nosowego, w przypadku pełnego sprzężenia akustycznego.

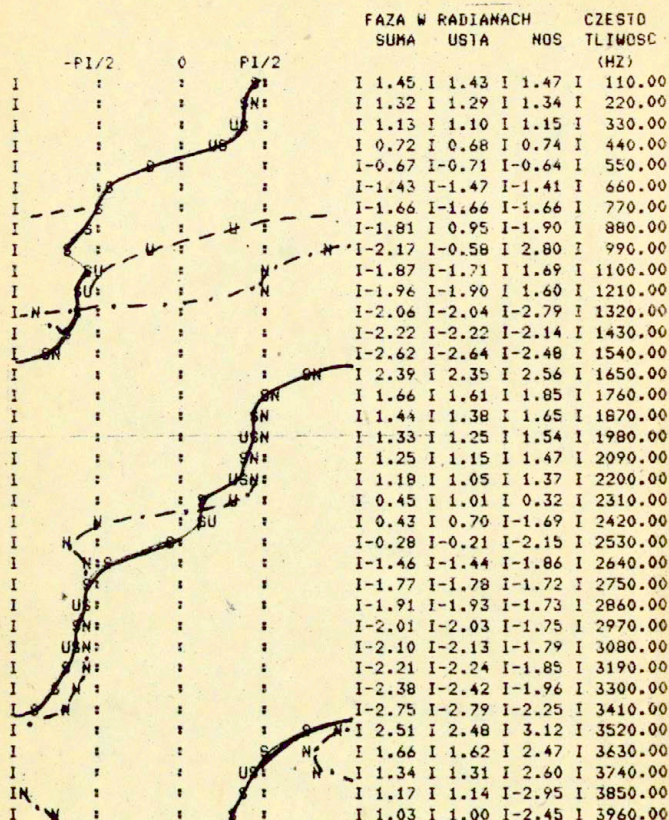
5. Badanie wpływu miejsca podłączenia kanału nosowego do toru gardłowo-ustnego na obwiednię charakterystyki częstotliwościowej samogłosek nazalizowanych.

Eksperyment wykonano na przykładzie samogłoski neutralnej [j] , której konfiguracja artykulacyjna toru gardłowo-ustnego jest rurą o stałym przekroju o promieniu równym ok. 1.26 cm, a więc kanał nosowy jest podłączony zawsze do rury o tej samej konfiguracji geometrycznej. Bocznik w postaci układu rur o przekrojach odpowiadających geometrii toru nosowego podłączony jest kolejno po 4,5,6,7,8,9,10,11 segmencie toru gardłowo-ustnego. Trzy pierwsze segmenty przedstawiające wlot kanału nosowego ustalono na podstawie analizy impedancji wejściowej toru nosowego i przyjęto, że $R_1=0.5$ cm, $R_2=0.8$ cm i $R_3=1.1$ cm. Rysunki 21.- 28 przedstawiają przebiegi amplitudy i fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa oraz ich sumy w funkcji częstotliwości dla kolejnych miejsc podłączenia kanału nosowego do kanału gardłowo-ustnego. Sumaryczny sygnał wyjściowy jest superpozycją sygnałów u wylotu ust i nosa. Charakterystyka częstotliwościowa obu sygnałów (ust i nosa) zależy od geometrii danego kanału, która jednoznacznie określa transmitancję, a także od impedancji wejściowej toru bocznikującego. Zmiana miejsca podłączenia toru nosowego powoduje zmianę całkowitej transmitancji kanału gardłowo-nosowego, zmianę impedancji wejściowej odcinka ustnego toru gardłowo-ustnego w miejscu połączenia obu kanałów oraz zmianę punktu podłączenia impedancji wejściowej kanału nosowego co wpływa na zmianę transmitancji toru gardłowo-ustnego. Bez zmian pozostaje natomiast charakterystyka pobudzenia krtańowego i impedancji promieniowania obu wylotów.

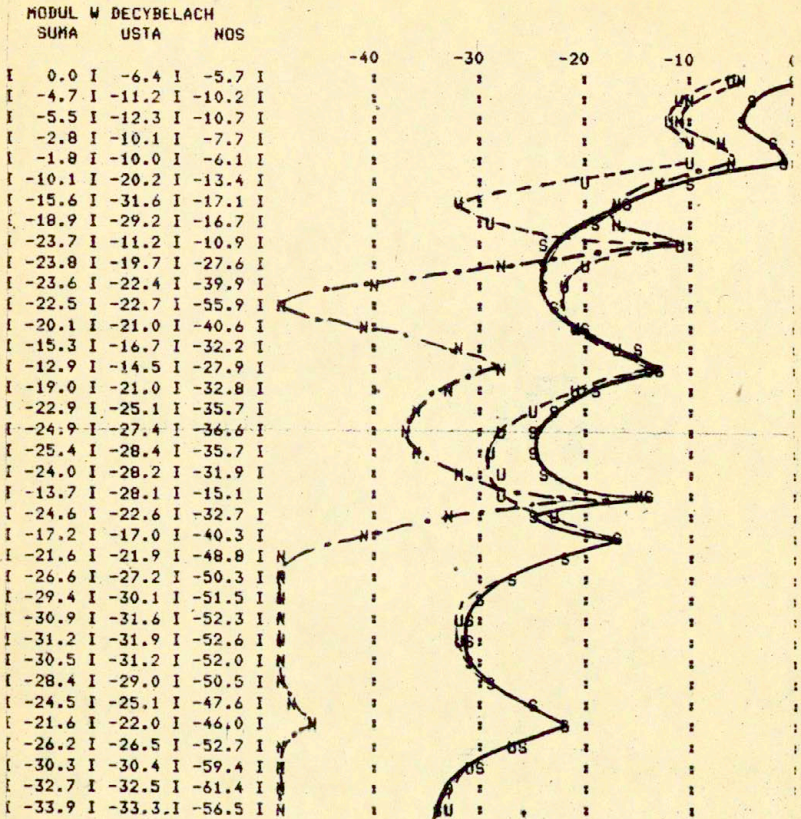
Wszystkie te czynniki ulegają zmianom w określonych zakresach, i w zależności od stosunków fazowych ciśnienia akustycznego u wylotu ust i nosa obserwuje się sumowanie lub odejmowanie chwilowych wartości ciśnienia lokalnych własności badanej funkcji, szczególnie widoczne na obwiedni widma odpowiadającego sumie sygnałów.

Formant F1 pozostaje niezmienny zarówno w przypadku toru nosowego, ustnego i sumarycznego. Sygnał w obrębie drugiego formantu (ok. 900 Hz) dla kanału ustnego i nosowego osiąga maksimum dla tych samych częstotliwości, natomiast ich fazy są przeciwne, w związku z powyższym w sygnale sumarycznym następuje obniżenie poziomu sygnału. Przesunięcie punktu sprzężenia akustycznego wiąże się w tym obszarze częstotliwości z tendencją zmniejszania się udziału składowych z kanału ustnego i zwiększania się udziału składowych z kanału nosowego wraz z przemieszczaniem się punktu sprzężenia (położenie 4-11). Obraz odpowiadający typowej strukturze anatomicznej, w której sprzężenie akustyczne między kanałami nosowym i ustno-gardłowym jest w odległości ok. 7 cm od głośni, co odpowiada miejscu połączenia po 7 segmencie toru gardłowo-ustnego przedstawiono na rys.24.

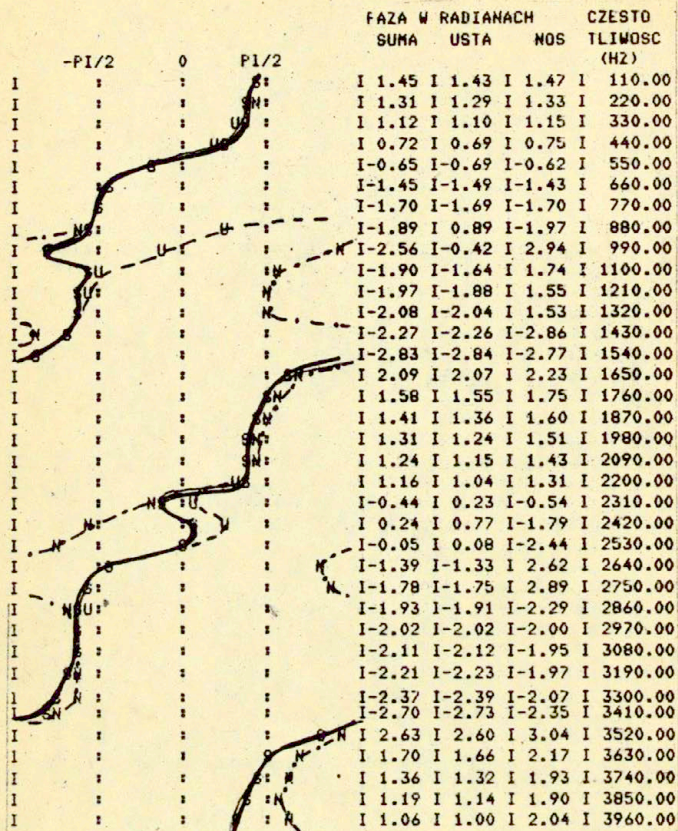
Powyżej drugiego bieguna (ok.900 Hz) następuje kompensacja fazowa składowych z kanału ustno-gardłowego i nosowego w wyniku czego obserwujemy lokalne minimum obwiedni sumarycznej transmitancji. Powstałe minimum na obwiedni sygnału sumarycznego wzrasta przy przesuwaniu miejsca połączenia kanałów w kierunku ust, natomiast maleje przy przesuwaniu miejsca rozgałęzienia od 7 segmentu w kierunku głośni.



Rys.21a Widmo fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich sumy. Kanał nosowy włączony po segmencie nr.4.

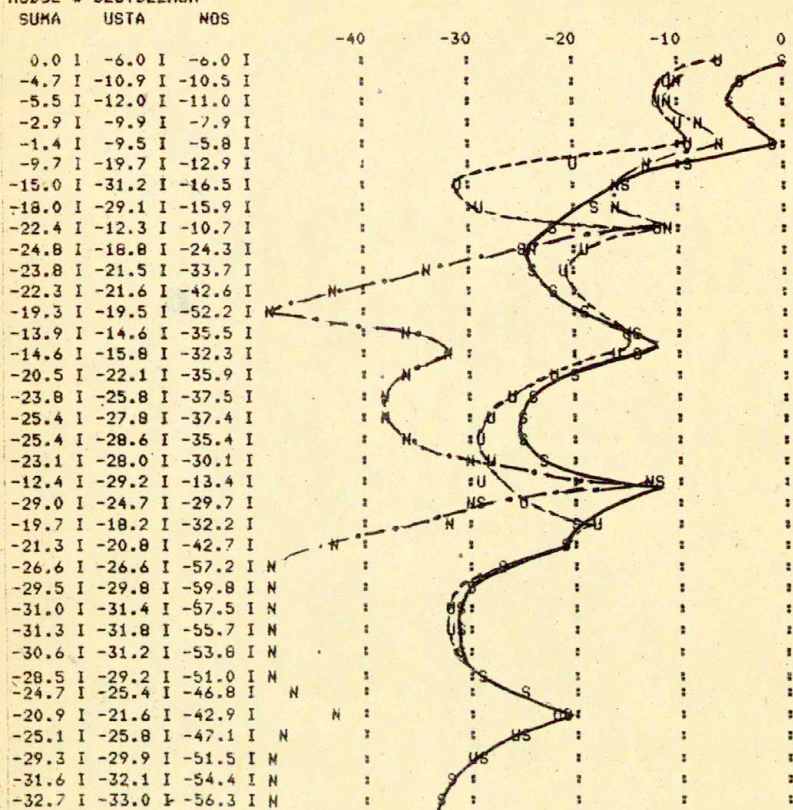


Rys.21b Widmo modułu ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich sumy. Kanał nosowy włączony po segmencie nr. 4.

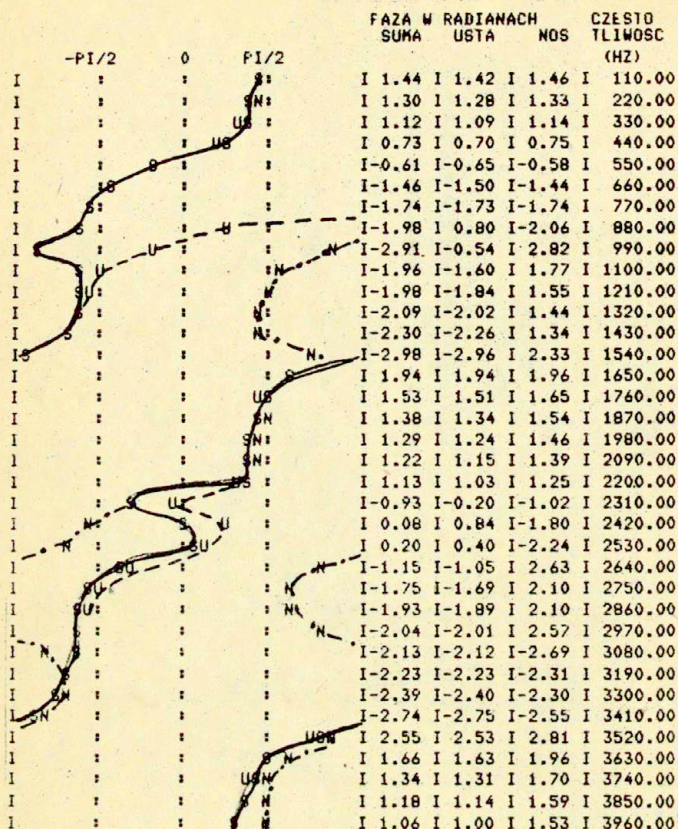


Rys.22a Widmo fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich sumy. Kanał nosowy włączony po segmentie nr. 5.

MODUL W DECYBELACH

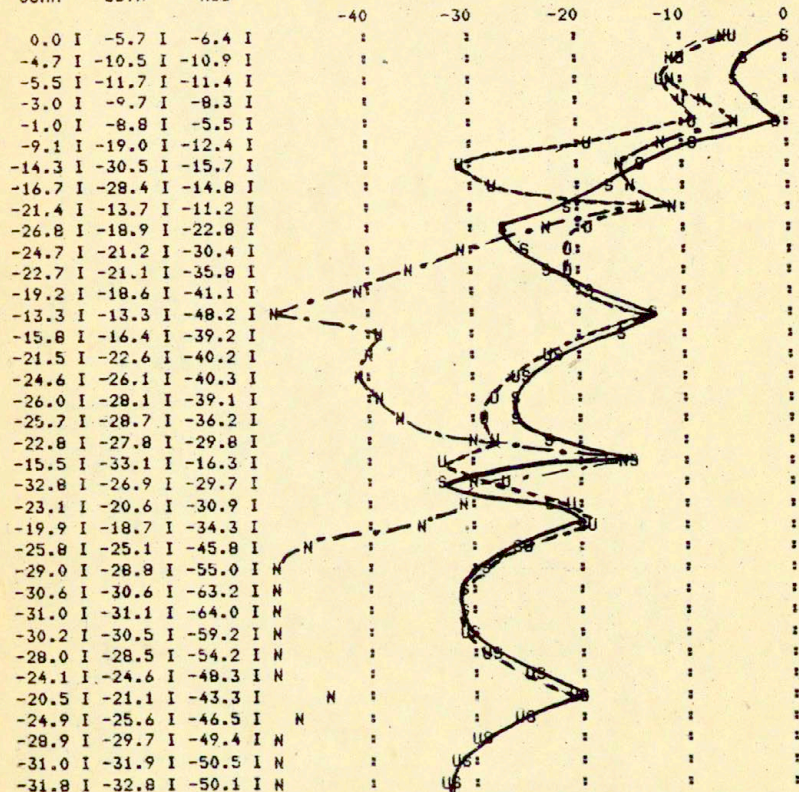


Rys.22b Widmo modułu ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich sumy. Kanał nosowy włączony po segmencie nr.5.

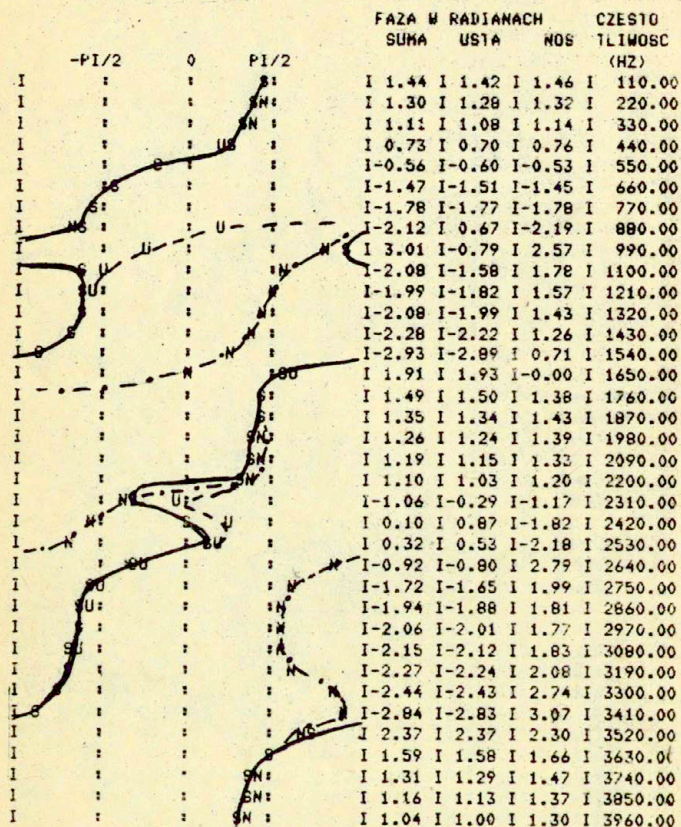


Rys.23a Widmo fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich sumy. Kanał nosowy włączony po segmencie nr.6.

MODUL W DECYBELACH
SUMA USTA NOS



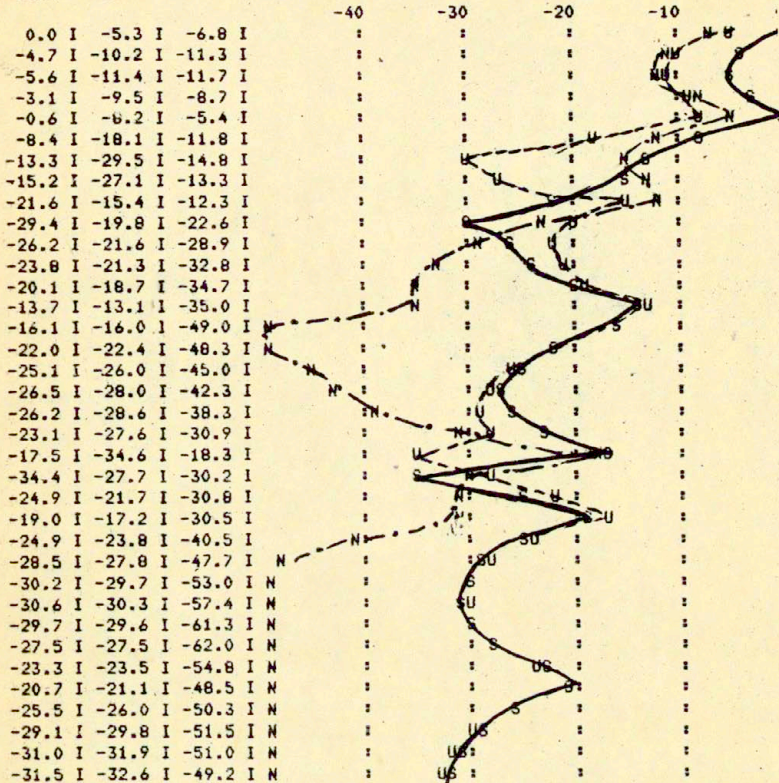
Rys.23b Widmo modułu ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich sumy. Kanał nosowy włączony po segmencie nr.6.



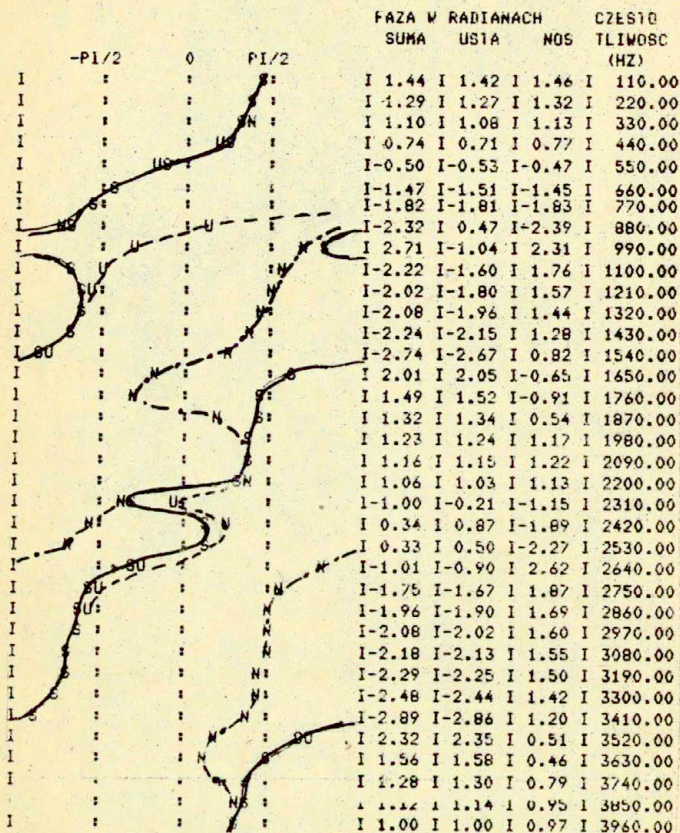
Rys.24a Widmo fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ichsumy. Kanał nosowy włączony po segmencie nr.7.

MODUL W DECYBELACH

SUMA USTA NOS

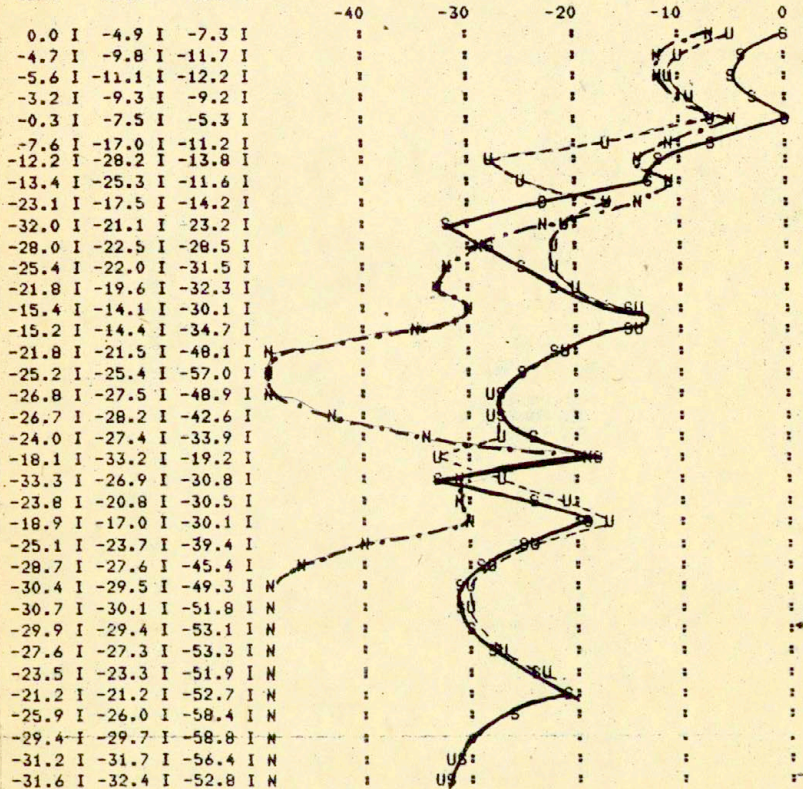


Rys.24b Widmo modułu ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich sumy. Kanał nosowy włączony po segmencie nr.7.

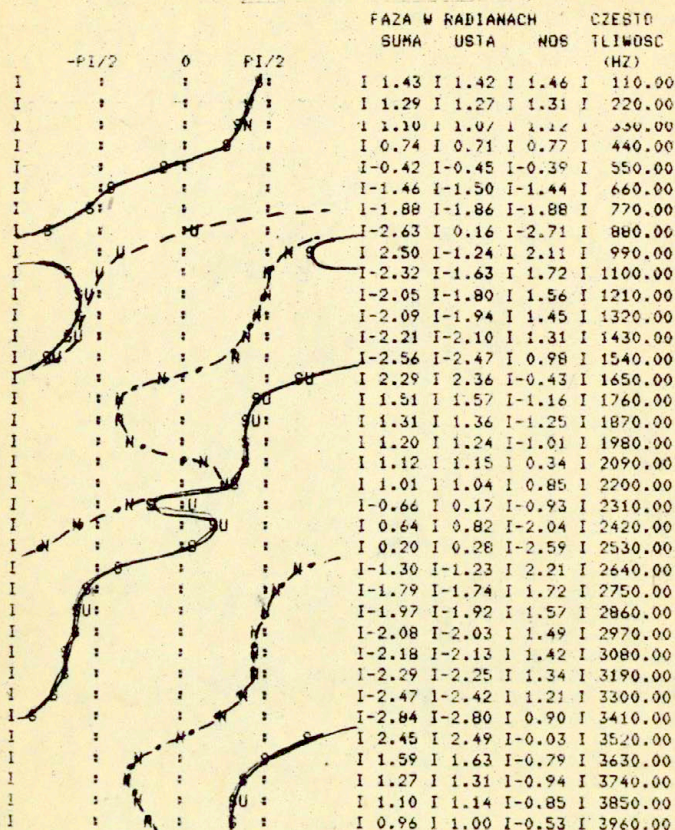


Rys.25a Widmo fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich sumy. Kanał nosowy włączony po segmentie nr.8.

MODUL W DECYBELACH
SUMA USTA NOS

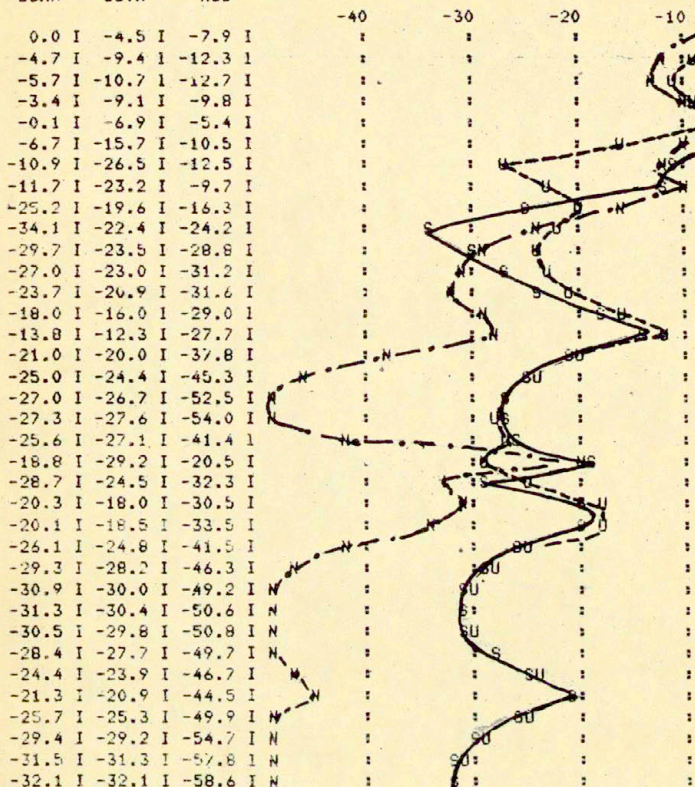


Rys.25b Widmo modułu ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich sumy. Kanał nosowy włączony po segmencie nr.8.

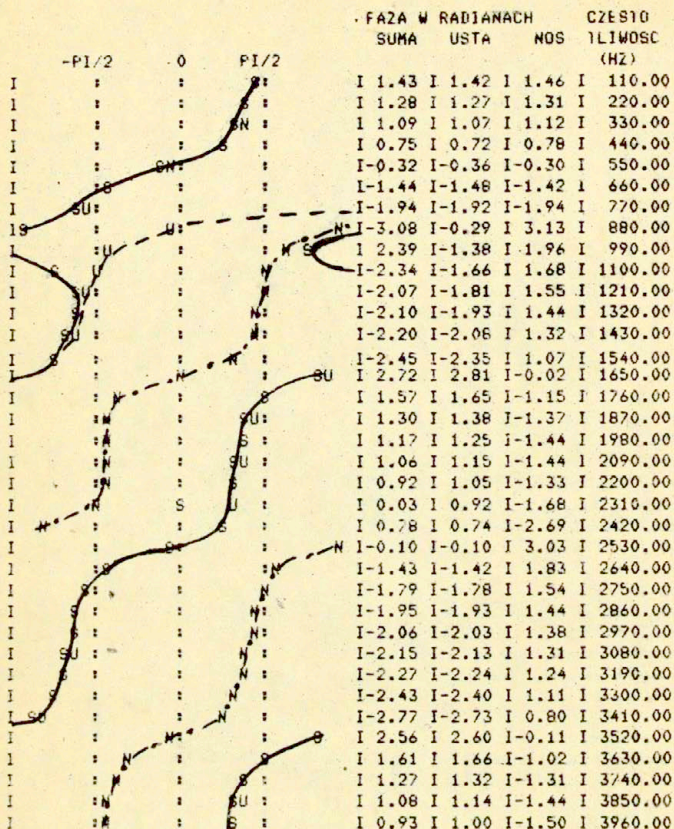


Rys.26a Widmo fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich sumy. Kanał nosowy włączony po segmencie nr.9.

MODUL W DECYBELACH
SUHA USTA NOS

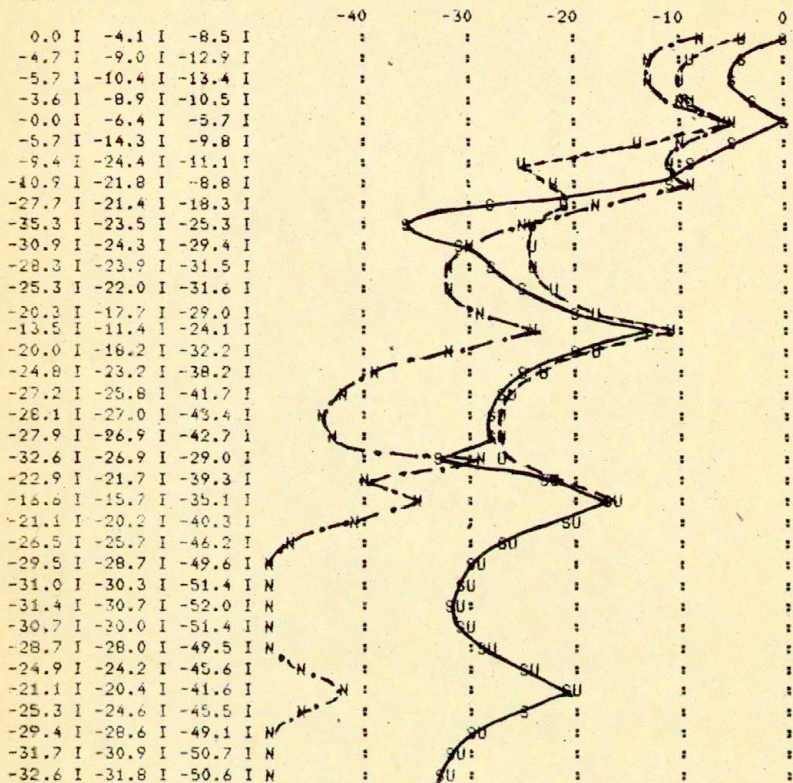


Rys.26b Widmo modułu ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich sumy. Kanał nosowy włączony po segmencie nr.9.

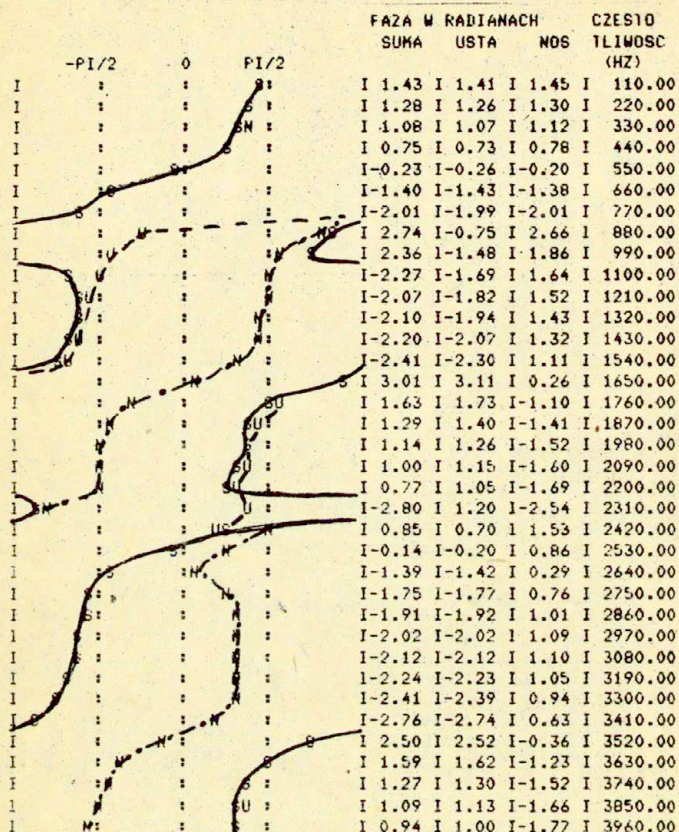


Rys.27a Widmo fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich suma. Kanał nosowy włączony po segmencie nr.10.

MODUL W DECYBELACH
SUMA USTA NOS



Rys.27b Widmo modułu ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich sumy. Kanał nosowy włączony po segmencie nr.10.

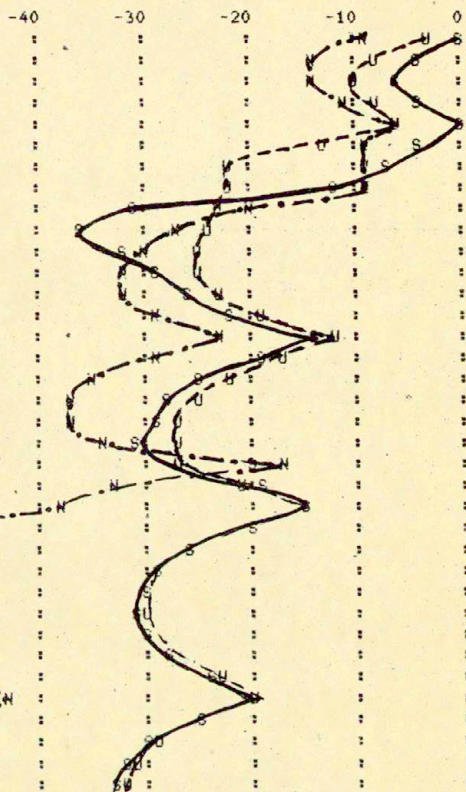


Rys.28a Widmo fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich suma. Kanał nosowy włączony po segmencie nr.11.

MODUL W DECYBELACH

SUMA USTA NOS

0.0 I	-3.6 I	-9.3 I
-4.8 I	-8.6 I	-13.7 I
-5.8 I	-10.0 I	-14.2 I
-3.9 I	-8.6 I	-11.4 I
-0.1 I	-5.9 I	-6.3 I
-4.7 I	-12.6 I	-9.1 I
-7.6 I	-22.0 I	-9.5 I
-11.9 I	-21.9 I	-9.6 I
-30.5 I	-22.7 I	-20.1 I
-35.5 I	-24.3 I	-26.4 I
-31.4 I	-24.9 I	-30.1 I
-29.0 I	-24.5 I	-31.9 I
-26.2 I	-22.7 I	-31.8 I
-21.7 I	-18.8 I	-29.2 I
-14.4 I	-11.9 I	-23.2 I
-19.2 I	-16.9 I	-28.8 I
-24.7 I	-22.4 I	-34.5 I
-27.6 I	-25.2 I	-37.0 I
-29.2 I	-26.5 I	-37.1 I
-30.8 I	-26.6 I	-33.8 I
-20.0 I	-27.0 I	-17.5 I
-19.3 I	-20.7 I	-33.1 I
-15.0 I	-15.3 I	-37.8 I
-20.2 I	-20.2 I	-49.8 I
-25.7 I	-25.4 I	-56.1 I
-28.7 I	-28.4 I	-57.2 I
-30.3 I	-29.9 I	-57.2 I
-30.7 I	-30.3 I	-56.4 I
-30.0 I	-29.5 I	-54.7 I
-28.0 I	-27.4 I	-51.7 I
-24.0 I	-23.5 I	-46.8 I
-20.5 I	-19.9 I	-42.3 I
-25.3 I	-24.5 I	-45.8 I
-29.4 I	-28.5 I	-48.5 I
-31.8 I	-30.7 I	-49.1 I
-32.9 I	-31.6 I	-48.0 I



Rys.28b Widmo modułu ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa i ich sumy. Kanał nosowy włączony po segmencie nr.11.

Obszar drugiego formantu ustnego (ok. 1500 Hz) pokrywa się z przebiegiem odpowiadającym sygnałowi sumarycznemu, natomiast sygnał z toru nosowego wykazuje w granicach 10 - 20 dB niższy poziom amplitudy ciśnienia akustycznego zgodny fazowo.

Typowy dla zjawiska nazalizacji efekt występuje w obszarze F3. Jest to związane z różnicą częstotliwości biegunów funkcji transmitancji toru ustnego i nosowego oraz wysokich poziomów ciśnienia akustycznego odpowiadającym obu biegunom. Wysoki poziom ciśnienia akustycznego na wyjściu toru nosowego w tym zakresie częstotliwości związany jest ze zmniejszaniem impedancji wejściowej kanału nosowego, co powoduje, że trzeci biegun funkcji transmitancji kanału nosowego wnosi analogiczny, jak kanał gardłowo-ustny wkład energetyczny w sygnał sumaryczny. We wszystkich przypadkach obejmujących występowanie sprzężenia akustycznego po segmentach nr 4, 5, 6, 7, 8, 9 obserwuje się układ dwóch biegunów w sygnale sumacyjnym przedzielonych zerem funkcji transmitancji. Najsilniejszy wpływ podłączenia kanału nosowego na powstanie zera funkcji transmitancji w zakresie trzeciego formantu w sygnale sumacyjnym występuje w przypadku sprzężenia akustycznego zlokalizowanego po 6 lub 7 segmentach, co odpowiada warunkom fizjologicznym. Przesuwanie punktu sprzężenia związane ze skracaniem lub wydłużaniem kanału gardłowo-ustnego, w kierunku głośni bądź ust, powoduje zmniejszenie tego efektu, co jest z kolei związane ze zmianą częstotliwości biegunów funkcji transmitancji toru gardłowo-nosowego przy stałych parametrach transmitancji toru gardłowo-ustnego.

6. Badania wpływu wielkości sprzężenia akustycznego między kanałami, gardłowo-ustnym i nosowym, na strukturę formantową samogłosek.

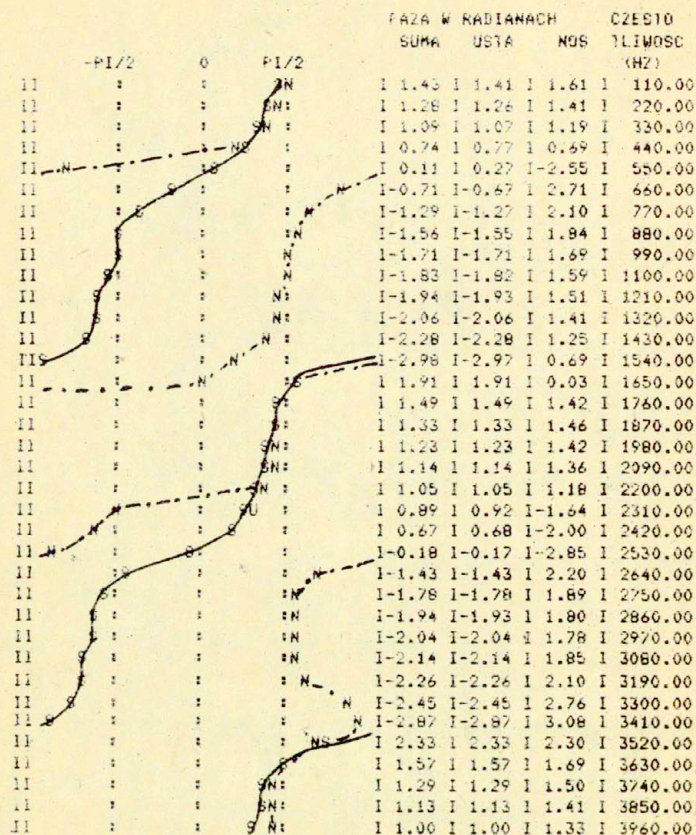
Badania wykonano na przykładzie samogłoski neutralnej oraz na wszystkich samogłoskach polskich. Przy podłączeniu kanału nosowego po siódmym segmencie toru gardłowo-ustnego, zmieniano konfigurację geometryczną wlotu kanału nosowego, modelując w ten sposób stopień sprzężenia akustycznego między kanałami. Wpływ zjawiska zwiększania wielkości sprzężenia akustycznego na strukturę formantową badanych samogłosek określono dla sześciu wcześniej wybranych ukształtowań wlotu toru nosowego (tablica 1 str.19).

Widma fazy i ciśnienia akustycznego dla samogłoski neutralnej przedstawiono na rys. 29 - 34. Promienie opisujące pierwsze segmenty toru nosowego (R_1, R_2, R_3) zawarte są na każdym rysunku w ramce.

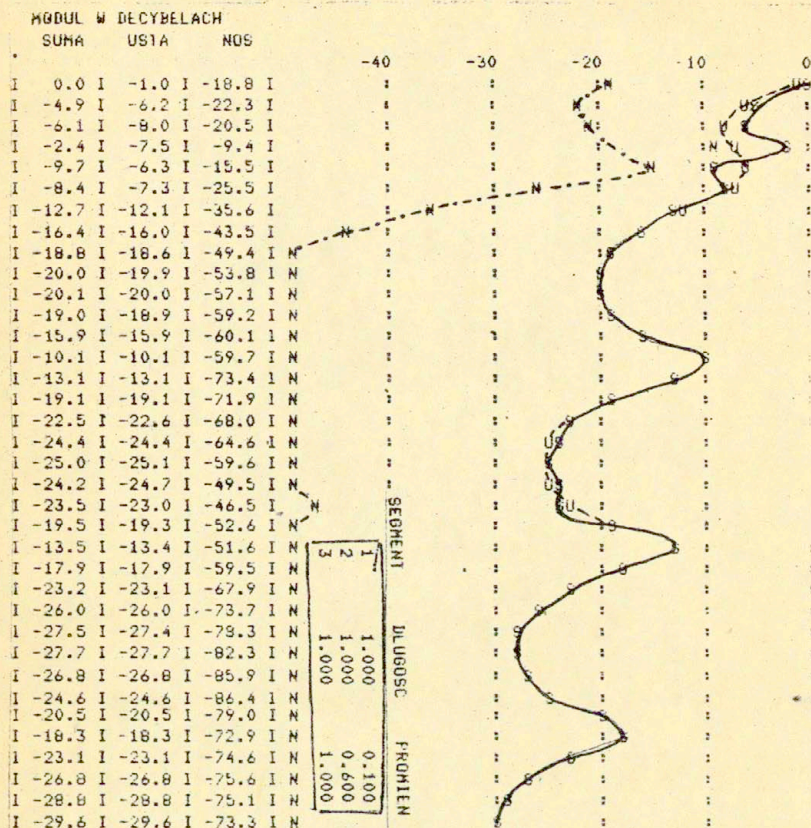
Wpływ dołączenia kanału nosowego do toru gardłowo-ustnego na widmo sygnału sumarycznego powiększa się ze wzrostem stopnia sprzężenia akustycznego między kanałami, przy czym wpływ ten maleje ze wzrostem częstotliwości.

Na przykładzie widm fazy i modułów ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa oraz ich sumy dla samogłoski neutralnej [ɛ] przeprowadzono dokładną obserwację zjawiska analizując kolejne zakresy formantowe tej samogłoski. Wynik tej przykładowej analizy zamieszczono poniżej.

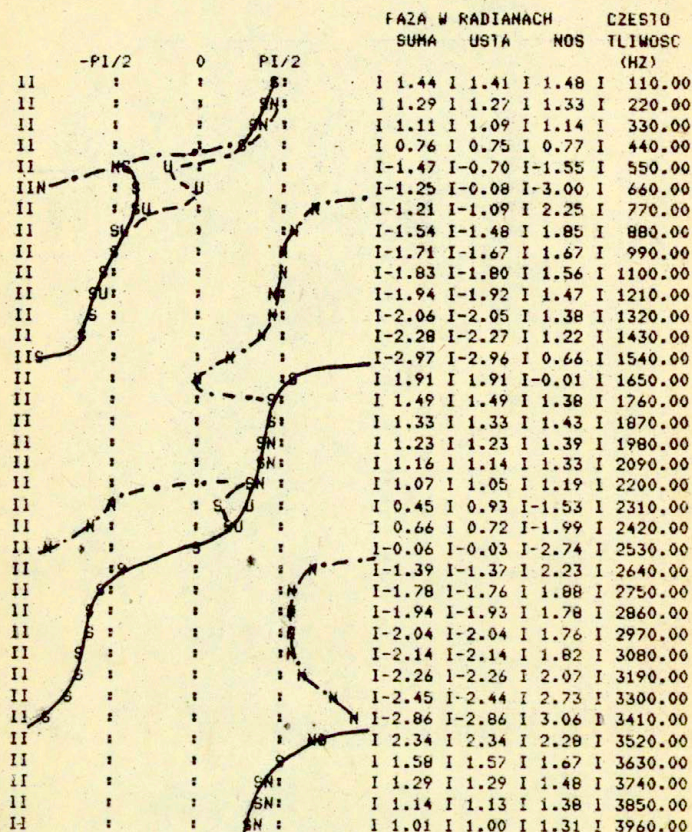
W obszarze pierwszego formantu (ok. 550 Hz) bez względu na stopień sprzężenia akustycznego między kanałami, sygnał u wy-



Rys.29a Widmo fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa oraz ich sumy dla samogłoski E.



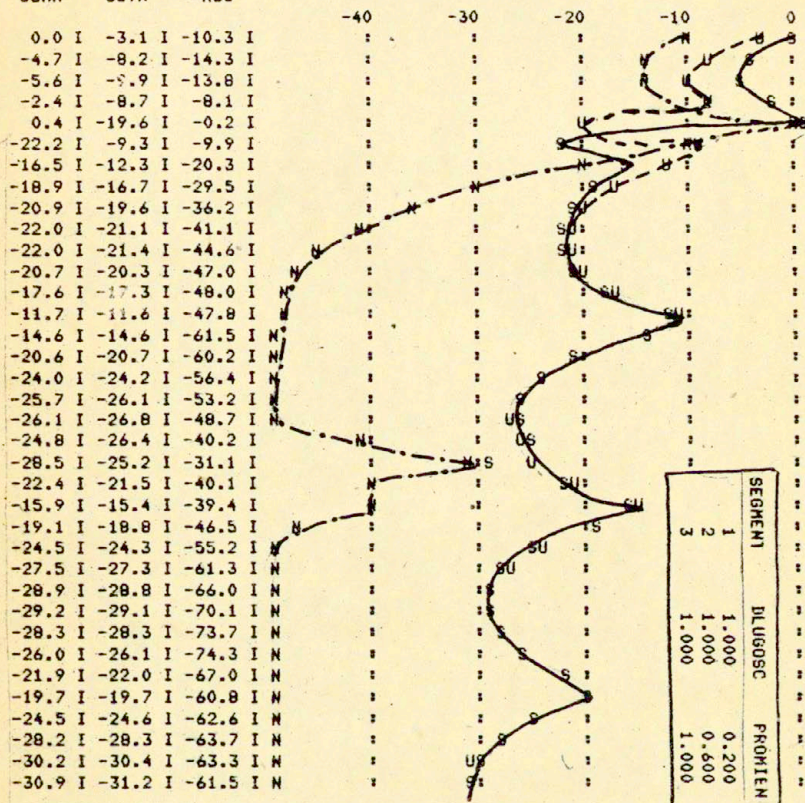
Rys.29b Widmo modułu ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa oraz ich sumy dla samogłoski E.



Rys.30a Widmo fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa oraz ich sumy dla samogłoski Э.

MODUL W DECYBELACH

SUMA USTA NOS



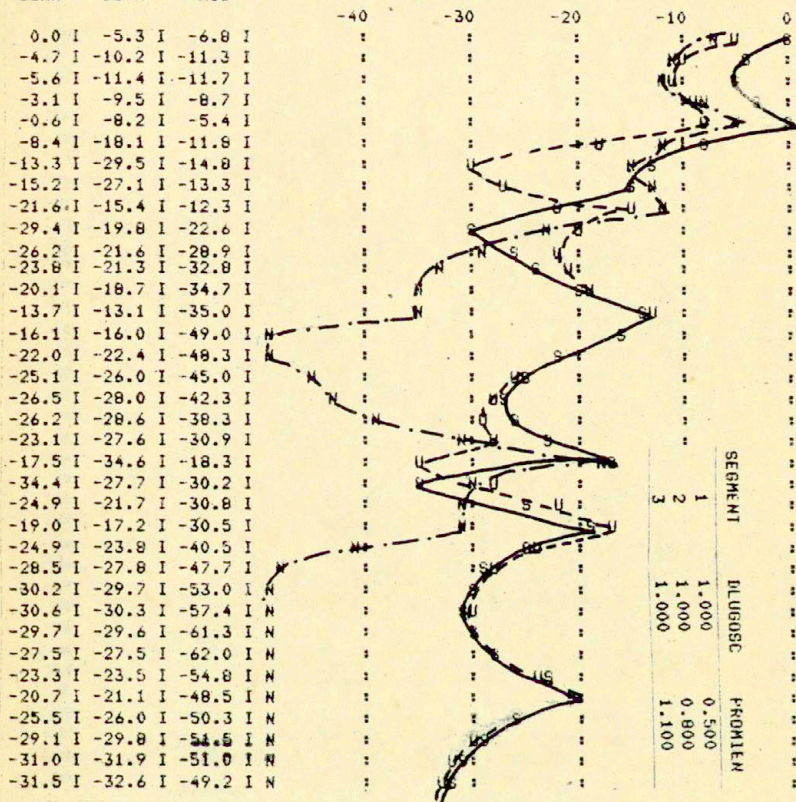
SEGMENT	DŁUGOSC	PROMIEN
1	1.000	0.200
2	1.000	0.600
3	1.000	1.000

Rys.30b Widmo modułu cieniienia akustycznego u wylotu ust, nosa oraz ich sumy dla samogłoski ɛ.

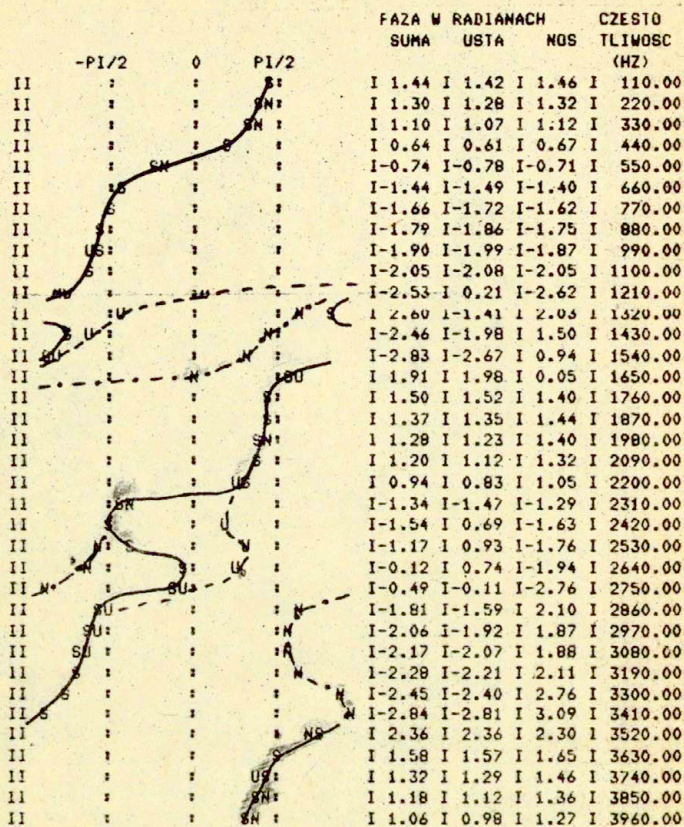
	FAZA W RADIANACH			CZESTO TLIWOSC (HZ)
	SUMA	USTA	NOS	
II	-P1/2	0	P1/2	I 1.44 I 1.42 I 1.46 I 110.00
II	:	:	SN:	I 1.30 I 1.26 I 1.32 I 220.00
II	:	:	SN:	I 1.11 I 1.08 I 1.14 I 330.00
II	:	:	US:	I 0.73 I 0.70 I 0.76 I 440.00
II	:	:	:	I-0.56 I-0.60 I-0.53 I 550.00
II	:	:	:	I-1.47 I-1.51 I-1.45 I 660.00
II	:	:	:	I-1.78 I-1.77 I-1.78 I 770.00
II	:	:	:	I-2.12 I 0.67 I-2.19 I 880.00
II	:	:	:	I 3.01 I-0.79 I 2.57 I 990.00
II	:	:	:	I-2.08 I-1.58 I 1.78 I 1100.00
II	:	:	:	I-1.99 I-1.82 I 1.57 I 1210.00
II	:	:	:	I-2.08 I-1.99 I 1.43 I 1320.00
II	:	:	:	I-2.28 I-2.22 I 1.26 I 1430.00
II	:	:	:	I-2.93 I-2.89 I 0.71 I 1540.00
II	:	:	:	I 1.91 I 1.93 I-0.00 I 1650.00
II	:	:	:	I 1.49 I 1.50 I 1.38 I 1760.00
II	:	:	:	I 1.35 I 1.34 I 1.43 I 1870.00
II	:	:	:	I 1.26 I 1.24 I 1.39 I 1980.00
II	:	:	:	I 1.19 I 1.15 I 1.33 I 2090.00
II	:	:	:	I 1.10 I 1.03 I 1.20 I 2200.00
II	:	:	:	I-1.06 I-0.29 I-1.17 I 2310.00
II	:	:	:	I 0.10 I 0.87 I-1.82 I 2420.00
II	:	:	:	I 0.32 I 0.53 I-2.18 I 2530.00
II	:	:	:	I-0.92 I-0.80 I 2.79 I 2640.00
II	:	:	:	I-1.72 I-1.65 I 1.99 I 2750.00
II	:	:	:	I-1.94 I-1.88 I 1.81 I 2860.00
II	:	:	:	I-2.06 I-2.01 I 1.77 I 2970.00
II	:	:	:	I-2.15 I-2.12 I 1.83 I 3080.00
II	:	:	:	I-2.27 I-2.24 I 2.08 I 3190.00
II	:	:	:	I-2.44 I-2.43 I 2.74 I 3300.00
II	:	:	:	I-2.84 I-2.83 I 3.07 I 3410.00
II	:	:	:	I 2.37 I 2.37 I 2.30 I 3520.00
II	:	:	:	I 1.59 I 1.58 I 1.66 I 3630.00
II	:	:	SN:	I 1.31 I 1.29 I 1.47 I 3740.00
II	:	:	SN:	I 1.16 I 1.13 I 1.37 I 3850.00
II	:	:	SN:	I 1.04 I 1.00 I 1.30 I 3960.00

Rys. 31a Widmo fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa oraz ich sumy dla samogłoski \bar{u} .

MODUL W DECYBELACH
SUMA USTA NOS



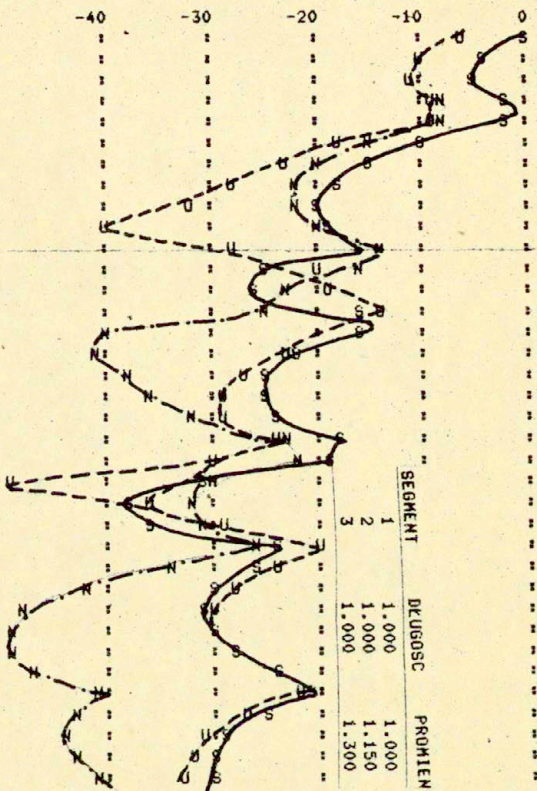
Rys.31b Widmo modułu ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa oraz ich sumy dla samogłoski E.



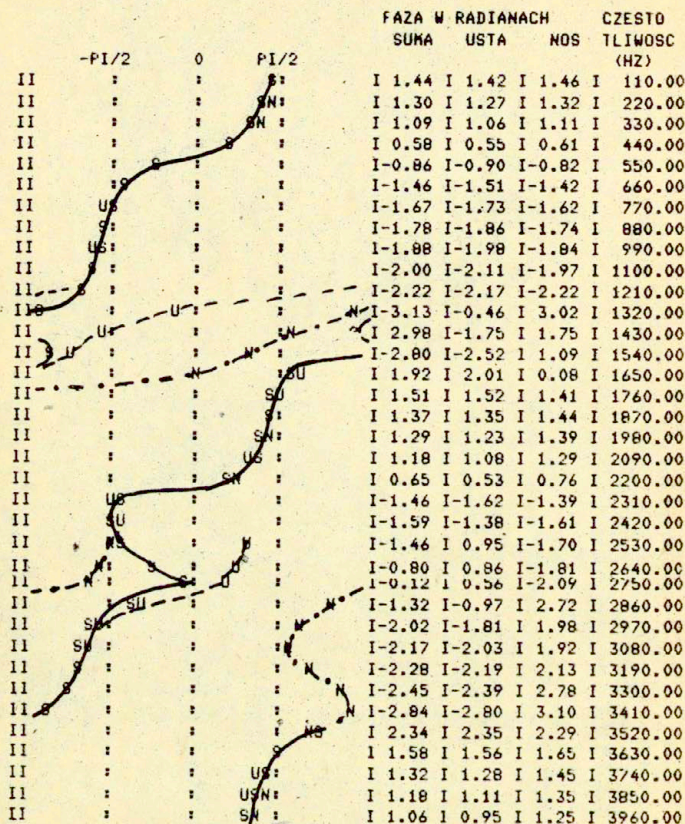
rys. 30a Widmo fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa oraz ich sumy dla samogłoski [ɔ].

MODUL W DECYBELACH
SUMA USTA NOS

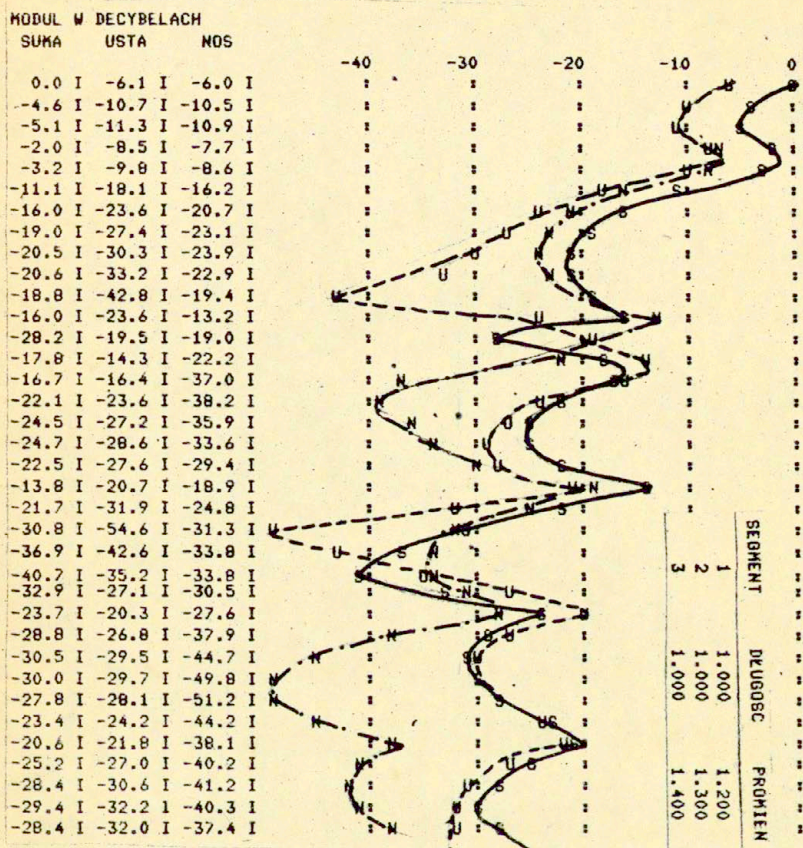
0.0	I	-6.0	I	-6.1	I
-4.6	I	-10.7	I	-10.6	I
-5.3	I	-11.5	I	-11.1	I
-2.5	I	-8.9	I	-8.1	I
-2.4	I	-9.2	I	-7.7	I
-10.3	I	-17.6	I	-15.2	I
-15.3	I	-23.4	I	-19.7	I
-18.3	I	-27.7	I	-21.9	I
-19.7	I	-31.6	I	-22.3	I
-19.4	I	-39.4	I	-20.3	I
-16.5	I	-27.9	I	-14.6	I
-24.9	I	-19.5	I	-16.5	I
-25.8	I	-19.0	I	-23.0	I
-16.1	I	-13.8	I	-25.1	I
-16.6	I	-16.4	I	-39.7	I
-22.2	I	-23.3	I	-40.3	I
-24.8	I	-27.0	I	-37.8	I
-25.4	I	-28.6	I	-35.5	I
-23.9	I	-28.4	I	-31.6	I
-17.8	I	-24.2	I	-23.3	I
-18.7	I	-29.5	I	-21.7	I
-30.5	I	-49.3	I	-29.9	I
-38.1	I	-36.1	I	-32.3	I
-35.9	I	-29.1	I	-31.3	I
-23.9	I	-19.8	I	-26.2	I
-26.3	I	-23.8	I	-34.0	I
-29.8	I	-28.3	I	-42.1	I
-30.7	I	-30.0	I	-47.8	I
-30.1	I	-29.8	I	-52.4	I
-27.8	I	-28.0	I	-53.5	I
-23.5	I	-24.1	I	-46.4	I
-20.7	I	-21.7	I	-40.2	I
-25.4	I	-26.7	I	-42.2	I
-28.7	I	-30.4	I	-43.3	I
-30.0	I	-32.2	I	-42.6	I
-29.6	I	-32.5	I	-40.2	I



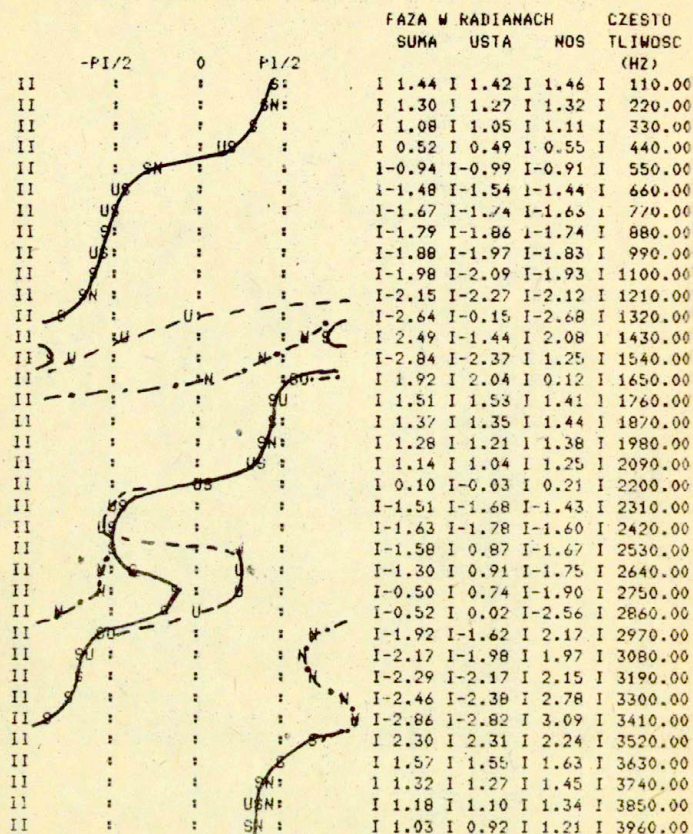
Rys.32b Widmo modulu ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa oraz ich sumy dla samogłoski [].



Rys.33a Widmo fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa oraz ich sumy dla samogłoski ɔ .



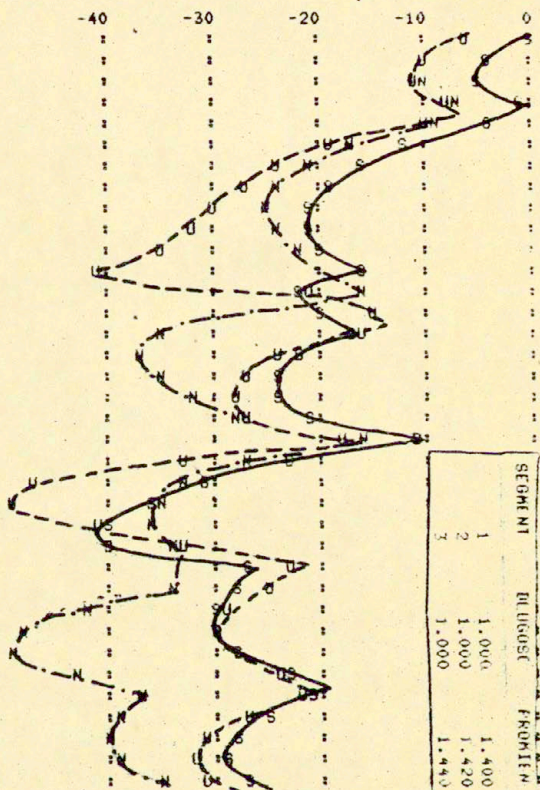
Rys. 33b Widmo modułu ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa oraz ich sumy dla samogłoski ɛ .



Rys. 34a Widmo fazy ciśnienia akustycznego u wylotu ust , nosa oraz ich sumy dla samogłoski ɔ .

MODUL W DECYBELACH
SUMA USTA NOS

0.0	I	-6.1	I	-5.9	I
-4.5	I	-10.7	I	-10.4	I
-4.9	I	-11.2	I	-10.7	I
-1.6	I	-8.0	I	-7.3	I
-3.8	I	-10.4	I	-9.3	I
-11.7	I	-18.6	I	-16.9	I
-16.5	I	-23.8	I	-21.4	I
-19.5	I	-27.4	I	-23.9	I
-21.0	I	-29.8	I	-24.9	I
-21.3	I	-31.7	I	-24.4	I
-19.9	I	-34.3	I	-21.7	I
-16.3	I	-40.3	I	-15.9	I
-21.8	I	-20.9	I	-16.0	I
-19.9	I	-15.0	I	-20.2	I
-16.7	I	-16.4	I	-34.8	I
-22.1	I	-23.8	I	-36.7	I
-24.1	I	-27.3	I	-34.5	I
-24.0	I	-28.3	I	-32.2	I
-21.0	I	-26.5	I	-27.6	I
-10.7	I	-17.7	I	-15.8	I
-23.3	I	-32.8	I	-26.8	I
-31.0	I	-46.8	I	-32.5	I
-36.0	I	-51.5	I	-34.9	I
-40.1	I	-40.7	I	-35.3	I
-39.3	I	-33.1	I	-33.4	I
-27.2	I	-22.6	I	-27.4	I
-27.4	I	-24.9	I	-33.6	I
-30.2	I	-28.9	I	-42.0	I
-30.0	I	-29.7	I	-47.7	I
-27.8	I	-28.2	I	-49.3	I
-23.3	I	-24.2	I	-42.4	I
-20.7	I	-22.2	I	-36.6	I
-25.3	I	-27.4	I	-38.8	I
-28.1	I	-30.8	I	-39.7	I
-28.8	I	-32.1	I	-38.5	I
-27.0	I	-31.2	I	-35.1	I



Rys. 34b Widmo modułu ciśnienia akustycznego u wylotu ust, nosa oraz ich sumy dla samogłoski neutralnej [ɤ].

lotu nosa jest niższy co do poziomu od sygnału u wylotu ust. Począwszy od sprzężenia akustycznego wyrażonego wielkością promienia pierwszego segmentu wynoszącego 0.5 cm sygnały z ust i nosa w tym zakresie częstotliwości są porównywalne pod względem poziomu a także fazy.

Częstotliwości formantowe związane z kanałem ustnym i nosowym mają zbliżone wartości w zakresie drugiego (1500 Hz) i trzeciego (2500 Hz) formantu. W miarę wzrostu stopnia sprzężenia akustycznego obu kanałów poziom sygnału wyjściowego u wylotu nosa jest coraz większy czemu towarzyszy narastające rozszczepianie się drugiego i trzeciego formantu w sygnale sumarycznym. Zjawisko takie jest wynikiem bliskiego położenia maksimów widma sygnałów z ust i nosa. Przeciwność faz obu sygnałów w przedziale częstotliwości pomiędzy maksimami powoduje powstanie głębokiego minimum amplitudy sygnału sumarycznego, a w efekcie rozszczepienie formantów.

W zakresie wyższych formantów wpływ kanału nosowego jest znacznie mniejszy.

7. Podsumowanie.

Celem pracy było stworzenie modelu symulacyjnego toru głosowego, który odtwarzałby różne warunki artykulacji dźwięków samogłoskowych z uwzględnieniem indywidualnych cech anatomicznych narządu głosu. W pracy określono hipotetyczny przekrój toru nosowego, jako niezmienny w czasie artykulacji a wykazujący jedynie różnicowania osobnicze. Opracowano sposób połączenia toru nosowego do toru gardłowo-ustnego opracowanego już wcześniej. Ponadto empirycznie potwierdzono trafność wyboru miejsca połączenia obu kanałów. W ten sposób powstało narzędzie badawcze do realizowania badań modelowych nad układem biologicznym jakim jest kanał głosowy. Badania modelowe narządu mowy mają szczególne znaczenie przy rozwijaniu akustycznych metod diagnostycznych w laryngologii i foniatryi, między innymi istotne dla badań charakteru rozszczepu podniebienia - jego rozległości oraz miejsca lokalizacji. Wymuszona nazalizacja jaka ma miejsce przy rozszczepie podniebienia powoduje widoczne zmiany w strukturze formantowej wymawianych głosek. W przypadku nazalizacji struktura widmowa pierwotnie nienazalizowanych głosek wykazuje charakterystyczne zjawisko rozszczepiania się formantów, szczególnie trzeciego i drugiego.

Obserwacja i obiektywna dokumentacja procesu rehabilitacji osób po przebytej operacji rozszczepu podniebienia wymaga porównywania bieżącego stanu mowy pacjenta z przewidywanym stanem możliwym przy jego strukturze anatomicznej. Powstały model toru głosowego pozwala na określenie tego stanu.

Inną dziedziną zastosowań badań modelowych są badania związane z analizą i automatycznym rozpoznawaniem mowy w opar-

ciu o artykulacyjną klasyfikację głosek oraz tego samego rodzaju syntezę mowy. Ponadto badania modelowe mogą służyć jako narzędzie wspomagające procesy dydaktyczne w nauce poprawnej wymowy zwłaszcza w lingwistyce i logopedii.

Bibliografia

1. BJUGGREN, G, FANT, G., 1964 : The nasal cavity structure.-
STL-QPSR ., 4, 5-17
2. FANT, G., 1975 : A vocal-tract area and length perturbations.
- STL-QPSR., 4, 1-14
3. HECKER, M., 1962 : Studies of nasal consonants with an articulatory speech synthesizer.- Journ. Acoust. Soc. Amer., 34,
179-188
4. HOUSE, A., 1957 : Analog studies of nasal consonants. - Jour.
Speech and Hearing Disorders., 22, 190-204
5. HOUSE, A., STEVENS, K., 1956 : Analog studies of the nazalization of vowels.- Journ. Speech and Hearing Disorders .,
21, 218-232
6. KACPROWSKI, J., MIKIEL, W., SZENCZYK, A., 1976 : Akustyczne badania modelowe rozszczepu podniebienia. - Arch. Akustyki, 11, 2, 167-187
7. MRAYATI, M., CARRE, R., 1979 : Relations entre la forme du conduit vocal et les caracteristiques acoustiques des voyelles francaises. - Phonetica., 33, 285-306.
8. MRAYATI, M., CARRE, R., 1975 : Acoustic aspects of french nasal vowels. - Journ. Acoust. Soc. Amer., 57, 549A
9. NOWAKOWSKA, W., 1983 : Model symulacyjny toru głosowego gardłowo-ustnego. - Prace IPPT

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