

**W. Jassem, M. Krzyżko,
P. Stolarski**

**CZĘSTOŚCIWOŚCI FORMANTOWE SAMOGŁOSEK
JAKO CECHY FONEMATYCZNE I OSOBNICZE
W ŚWIELE STATYSTYCZNEJ
ANALIZY DYSKRYMINACYJNEJ**

27/1984

WARSZAWA 1984

ISSN 0208-5658

Praca wpłynęła do Redakcji 18 maja 1984 r.

56975



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 180 egz. Ark. wyd. 2 Ark. druk. 2,5

Oddano do drukarni w czerwcu 1984 r.

Nr zamówienia 436/84.

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul. Śniadeckich

Wiktor Jassem
Pracownia Fonetyki Akustycznej IPPT PAN
Mirosław Krzyśko
Przemysław Stolarski
Ośrodek Informatyki UAM

CZĘSTOTLIWOŚCI FORMANTOWE SAMOGŁOSEK JAKO CECHY FONEMATYCZNE
 I OSOBNICZE W ŚWIETLE STATYSTYCZNEJ ANALIZY DYSKRYMINACYJNEJ

1. Wstęp

Tradycyjna klasyfikacja fonetyczna samogłosek posługuje się trzema cechami: (a) stopniem otwarcia, (b) położeniem wzniesienia języka względem ściany gardła oraz (c) stopniem zakręglenia warg. Jakkolwiek istnieją rozbieżności w literaturze przedmiotu co do klasyfikacji polskich samogłosek, na ogół przyjmuje się, że cecha (c) jest w polskim języku nieistotna. Wykazano (np. Jassem 1973), że zachodzi duża zgodność między klasyfikacją polskich samogłosek w terminach artykulacyjnych (przez odniesienie do samogłosek podstawowych) a ich położeniem na płaszczyźnie, której współrzędnymi są częstotliwości dwóch najniższych formantów w ich widmie oraz (Jassem, Krzyśko, Dyczkowski 1972) że wyższe formanty mają znikome znaczenie dyskryminacyjne, w każdym razie w przypadku samogłosek stacjonarnych. Już Delattre i in. wykazali przeszło 30 lat temu (Delattre et al. 1951) możliwość zadowalającej syntezy wszystkich samogłosek podstawowych za pomocą tylko 2 formantów, a Fant (1960, str. 106 i dal.) udowodnił teoretycznie i eksperymentalnie, że fonologiczne zróżnicowania między samogłoskami są związane głównie z częstotliwościami F_1 i F_2 . Za pomocą wyłącznie parametrów F_1 i F_2 (częstotliwości dwóch najniższych formantów) zidentyfikowano z zadowalającą poprawnością

samogłoski polskie w typowych wypowiedziach (Jassem, Dyczkowski i Szybista 1976). Wykazano jednak również, na polskim materiale, że F_1 i F_2 różnicują, w obrębie poszczególnych samogłosek, indywidualne głosy (Jassem 1968, Caliński i Kaczmarek 1968, Jassem, Krzyśko, Dyczkowski 1971). Brak natomiast było pracy, w której spróbowano by określić ilościowo, które różnice - międzyfonematyczne czy międzyosobnicze - silniej wpływają na częstotliwości formantów F_1 i F_2 poprzez analizę tego samego materiału fonetycznego z obu punktów widzenia. Brak ten próbuje wstępnie uzupełnić niniejsza praca.

Wybór parametrów F_1 i F_2 jako fonetyczno-akustycznych cech różnicujących jest również podyktowany względami praktycznymi. Te parametry są mianowicie stosunkowo odporne na zakłócenia i zniekształcenia liniowe oraz łatwe w ekstrakcji analogowej lub cyfrowej.

2. Materiał

Materiał doświadczalny stanowiło 40 wypowiedzi o strukturze CVC ze spółgłoską zwartą lub trącą dźwięczną w nagłosie oraz zwartą lub trącą bezdźwięczną w wygłosie. Poszczególne fonemy samogłoskowe były reprezentowane na liście wypowiedzi, jak następuje: /i/ 7 razy, /ɨ/ 6, /e/ 7, /a/ 7, /o/ 7 oraz /u/ 6 razy. Niektóre wypowiedzi były autentycznymi jednostkami leksykalnymi (wyrazami) polskimi (np. bit /bit/, byk /bɨk/, giez /jes/), pozostałe były logatomami o budowie zgodnej z zasadami fonotaktyki polskiej (nie występowały na przykład sekwencje /ja/ lub /zɨ/ itp.). Ograniczono bardzo znacznie wpływ allofonicznej zmienności specyficznej unikając np. spółgłosek nosowych oraz (poza jednym przypadkiem logatomu /jeɕ/) obustronnego kontekstu palatalnego¹.

¹ Specyficzna zmienność allofoniczna jest zjawiskiem charakterystycznym dla danego języka i może być percypowana. Stanowi ona jeden z elementów struktury fonologicznej. Zmienność niespecyficzna ma charakter uniwersalny, jest wynikiem fizjologicznie uwarunkowanych zjawisk koartykulacyjnych i nie jest nawet w najkorzystniejszych, ale naturalnych warunkach, percypowana (por. np. Ladefoged 1967).

Lista wypowiedzi (napisana w normalnej ortografii) została odczytana przez cztery głosy męskie o zbliżonej średniej częstotliwości podstawowej: WJ, RC, PD i AM, z których jeden - WJ - jest głosem wywiczonym. Zapisów dokonano w studio o bardzo silnie zredukowanym pogłosie przy zastosowaniu wysokiej klasy aparatury zapewniającej wierność zapisu i odtwarzania.

Materiał został zanalizowany za pomocą analogowego spektrografu Kay Electric Co. przy zastosowaniu szerokiej i wąskiej wstęgi analizy, a wartości F_1 i F_2 zostały odczytane w odstępach $\Delta t = 20$ ms z dokładnością $\Delta f = 50$ Hz. Tablica 1 ukazuje liczbę pomiarów dla wszystkich reprezentacji danego idiofonemu¹. Iloczas poszczególnych samogłosek nie był zróżnicowany. Dla znakomitej większości przypadków uzyskano 7 lub 8 odczytów. Każdy odczyt potraktowano jako dwuzmienną obserwację (wektor w dwuwymiarowej przestrzeni cech). Z Tablicy 1 widać, że iloczas samogłoskowy był regularnie nieco dłuższy w głosie RC, w którym dla każdego idiofonemu uzyskano średnio ok. 15% więcej odczytów niż w pozostałych głosach.

3. Układy danych

Dane pomiarowe zanalizowano statystycznie w czterech układach obliczając średnie (i odpowiednie macierze sum kwadratów i sum iloczynów) tak, aby odpowiedzieć na następujące pytania:

(1) Czy w obrębie każdego głosu średnie wektory dla poszczególnych idiofonemów są dostatecznie zróżnicowane.

(2) Czy przy połączeniu wszystkich głosów średnie wektory dla poszczególnych fonemów są dostatecznie zróżnicowane.

(3) Czy w obrębie każdego fonemu średnie wektory dla poszczególnych głosów są dostatecznie zróżnicowane.

(4) Czy przy połączeniu wszystkich idiofonemów średnie wektory dla poszczególnych głosów są dostatecznie zróżnicowane.

Formalnie, oznaczając samogłoski przez i oraz głosy przez j postawiono następujące hipotezy zerowe:

$$(1) \mu_{1j} = \mu_{2j} = \mu_{3j} = \mu_{4j} = \mu_{5j} = \mu_{6j} \text{ dla } j=1, \dots, 4$$

$$(2) \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6.$$

¹

Definicję idiofonemu podano m.in. w pracy Jassem 1971, str.187.

$$(3) \mu_{i1} = \mu_{i2} = \mu_{i3} = \mu_{i4} \quad \text{dla } i = 1, \dots, 6$$

$$(4) \mu_{.1} = \mu_{.2} = \mu_{.3} = \mu_{.4} .$$

4. Metody statystyczne

4.1. Zmienne dyskryminacyjne

Niech $\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_p)'$ będzie zespołem p zmiennych losowych obserwowanych w każdej z populacji $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k$. Zakładamy, że wektor losowy \underline{x} w populacji π_i ma rozkład normalny z wektorem oczekiwanych $\underline{\mu}_i$ i dodatnio określoną macierzą kowariancji $\underline{\Sigma}_i$, $i = 1, 2, \dots, k$. Duże znaczenie praktyczne ma przekształcenie zmiennych x_1, x_2, \dots, x_p w nowe zmienne dyskryminacyjne u_1, u_2, \dots, u_r o specjalnych własnościach. Przed zdefiniowaniem zmiennych dyskryminacyjnych wprowadzimy następujące oznaczenia.

Oznaczmy przez $\bar{\underline{\mu}}$ średnią ważoną wektorów wartości oczekiwanych $\underline{\mu}_1, \underline{\mu}_2, \dots, \underline{\mu}_k$ z dodatnimi wagami N_1, N_2, \dots, N_k :

$$\bar{\underline{\mu}} = N^{-1} \sum_{i=1}^k N_i \underline{\mu}_i ,$$

gdzie $N = N_1 + N_2 + \dots + N_k$.

Oznaczmy przez $\underline{\Delta}$ macierz postaci

$$\underline{\Delta} = \sum_{i=1}^k N_i (\underline{\mu}_i - \bar{\underline{\mu}}) (\underline{\mu}_i - \bar{\underline{\mu}})' .$$

Nieujemnie określona macierz $\underline{\Delta}$, znana jako macierz niecentralności, reprezentuje różnice między wektorami wartości oczekiwanych k populacji $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k$. Macierz niecentralności

$\underline{\Delta}$ można zapisać w następującej równoważnej postaci:

$$\underline{\Delta} = N^{-1} \sum_{i=1}^k \sum_{\substack{j=1 \\ i < j}}^k N_i N_j (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_j) (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_j)' .$$

Oznaczmy dalej przez s rząd macierzy $\underline{\Delta}$.

DEFINICJA 1. Dla każdego naturalnego $r \in s$ kombinacje liniowe

$$u_i = \underline{c}'_i \underline{x} = c_{i1}x_1 + c_{i2}x_2 + \dots + c_{ip}x_p, \quad i = 1, 2, \dots, r,$$

zmiennych $\underline{x} = (x_1, x_2, \dots, x_p)'$, wzajemnie nieskorelowane i o wariancjach jednostkowych, nazywamy r pierwszymi zmiennymi dyskryminacyjnymi względem obranej miary dyskryminacyjnej, jeśli miarę tę maksymalizują.

W literaturze najpopularniejszymi miarami dyskryminacyjnymi są:

$$T_1^2(\underline{c}_1, \underline{c}_2, \dots, \underline{c}_r) = \text{tr} \left[\underline{c}' \underline{\Delta} \underline{c} (\underline{c}' \underline{\Sigma} \underline{c})^{-1} \right],$$

$$T_2^2(\underline{c}_1, \underline{c}_2, \dots, \underline{c}_r) = |\underline{c}' \underline{\Delta} \underline{c}| |\underline{c}' \underline{\Sigma} \underline{c}|^{-1},$$

$$T_3^2(\underline{c}_1, \underline{c}_2, \dots, \underline{c}_r) = \sum_{i=1}^k \sum_{\substack{j=1 \\ i < j}}^k N_i N_j (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_j)' \underline{c} \underline{c}' (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_j),$$

gdzie $\underline{c} = (\underline{c}_1, \underline{c}_2, \dots, \underline{c}_r)$ jest macierzą typu $p \times r$, $r \in s$.

Warunek nieskorelowania i jednostkowych wariancji zmiennych dyskryminacyjnych u_1, u_2, \dots, u_r ma następującą postać:

$$\underline{c}' \underline{\Sigma} \underline{c} = \underline{I}_r.$$

Stąd, zgodnie z definicją zmiennych dyskryminacyjnych, macierz \underline{c} należy wybrać tak, by zapewniała maksimum wyrażen

$$T_i^2(\underline{c}_1, \underline{c}_2, \dots, \underline{c}_r), \quad i = 1, 2, 3, \quad \text{przy warunku pobocznym } \underline{c}' \underline{\Sigma} \underline{c} = \underline{I}_r.$$

Można udowodnić (patrz np. Krzyśko (1982), str.11), że maksymalne wartości miar dyskryminacji wynoszą odpowiednio:

$$T_1^2(\underline{c}_1, \underline{c}_2, \dots, \underline{c}_r) = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_r,$$

$$T_2^2(\underline{c}_1, \underline{c}_2, \dots, \underline{c}_r) = \prod_{i=1}^r \lambda_i,$$

$$T_3^2(\underline{c}_1, \underline{c}_2, \dots, \underline{c}_r) = N(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_r)$$

i są one w każdym przypadku osiągame dla $\underline{c}_i = \underline{1}_i$, gdzie λ_i są pierwiastkami równania wyznacznikowego

$$|\underline{\Delta} - \lambda \underline{\Sigma}| = 0$$

natomiast \underline{l}_i są $\underline{\Sigma}$ - ortonormalnymi wektorami spełniającymi równanie

$$(\underline{\Delta} - \lambda_i \underline{\Sigma}) \underline{l}_i = \underline{0},$$

$i = 1, 2, \dots, r, \quad r \leq s.$

Zatem każda z trzech miar prowadzi do identycznych zmiennych dyskryminacyjnych

$$u_i = \underline{l}_i' \underline{x} = l_{i1}x_1 + l_{i2}x_2 + \dots + l_{ip}x_p, \quad i=1, 2, \dots, r, \quad r \leq s.$$

Odnotujemy teraz niektóre z ciekawych własności zmiennych dyskryminacyjnych.

1. Wariancje wszystkich zmiennych u_i są równe 1, natomiast $\text{Corr}(u_i, u_j) = 0$, dla $i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, s$, a więc zmienne dyskryminacyjne są nieskorelowane.
2. Zachodzi następujący związek

$$\sum_{j=1}^p \text{Corr}^2(x_i, u_j) = 1, \quad \text{dla } i=1, 2, \dots, p.$$

Związek ten można zapisać w następującej równoważnej postaci:

$$\text{Var } x_i = \sum_{j=1}^p \text{Cov}^2(x_i, u_j), \quad i = 1, 2, \dots, p.$$

Powyższe związki stanowią podstawę do interpretacji zmiennych dyskryminacyjnych. Ze związków tych jest widoczne, że poszczególne zmienne dyskryminacyjne w różnym stopniu wyjaśniają wariancje zmiennych pierwotnych. Miara tego wyjaśnienia jest kwadrat kowariancji między zmienną dyskryminacyjną i zmienną pierwotną.

3. Zmienne dyskryminacyjne są niezmiennicze względem liniowego przekształcenia nieosobliwego $\underline{y} = \underline{P} \underline{x}$. Nie istnieje więc tu problem normalizowania zmiennych pierwotnych, ponieważ normowanie nie zmienia zmiennych dyskryminacyjnych. Taki fakt nie ma miejsca w składowych głównych.

4. Odległość Mahalanobisa $D_p^2(\underline{\mu}_i, \underline{\mu}_j) = (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_j)' \underline{\Sigma}^{-1} (\underline{\mu}_i - \underline{\mu}_j)$ w p -wymiarowej przestrzeni zmiennych x_1, x_2, \dots, x_p jest równa

odległości euklidesowej w s -wymiarowej przestrzeni zmiennych dyskryminacyjnych u_1, u_2, \dots, u_s .

Wielkość

$$\frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_t}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_s} 100\%$$

określa, w jakim procencie zachowane są ważne odległości między k populacjami po przejściu do t -wymiarowej ($t \leq s$) przestrzeni zmiennych dyskryminacyjnych.

W praktyce parametry $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k, \bar{\mu}, \underline{\Sigma}, \underline{\Delta}$ nie są na ogół znane. Możemy je wtedy zastąpić estymatorami z próby.

Niech $\underline{x}_1^{(i)}, \underline{x}_2^{(i)}, \dots, \underline{x}_{N_i}^{(i)}$ będzie N_i -elementową próbą pobraną z populacji $\mathcal{T}_i, i = 1, 2, \dots, k$.

Oznaczmy przez

$$\bar{\underline{x}}_i = N_i^{-1} \sum_{j=1}^{N_i} \underline{x}_j^{(i)}$$

wektor wartości średnich z próby pobranej z populacji \mathcal{T}_i , przez

$$\bar{\underline{x}} = N^{-1} \sum_{i=1}^k N_i \bar{\underline{x}}_i, \quad N = N_1 + N_2 + \dots + N_k,$$

wektor wartości średnich z połączonych k prób, natomiast przez

$$\underline{W}_i = \sum_{j=1}^{N_i} (\underline{x}_j^{(i)} - \bar{\underline{x}}_i) (\underline{x}_j^{(i)} - \bar{\underline{x}}_i)'$$

macierz sum kwadratów i iloczynów z próby pobranej z populacji $\mathcal{T}_i, i = 1, 2, \dots, k$.

Oznaczmy ponadto przez

$$\underline{W} = \sum_{i=1}^k \underline{W}_i$$

wewnątrzpopulacyjną macierz sum kwadratów i iloczynów i niech

$$\underline{S} = (N-k)^{-1} \underline{W}.$$

Oznaczmy jeszcze przez

$$\underline{B} = N^{-1} \sum_{i=1}^k \sum_{\substack{j=1 \\ i < j}}^k N_i N_j (\bar{\underline{x}}_i - \bar{\underline{x}}_j) (\bar{\underline{x}}_i - \bar{\underline{x}}_j)'$$

międzypopulacyjną macierz sum kwadratów i iloczynów.

Jeśli za wagi występujące w określeniach parametrów $\bar{\mu}$, Δ przyjmiemy liczebności prób, to wielkości $\bar{x}_i, \bar{x}, \underline{S}, \underline{B}$ są nieobciążonymi estymatorami parametrów $\mu_i, \bar{\mu}, \underline{\Sigma}, \Delta$, $i=1,2,\dots,k$.

Ponadto z prawdopodobieństwem równym jedności macierz \underline{S} jest dodatnio określona. Rząd macierzy \underline{B} (oceny macierzy Δ), z prawdopodobieństwem jeden jest równy $\min(p,k-1)=v$.

DEFINICJA 2. Zmiennymi dyskryminacyjnymi z próby nazywamy kombinacje liniowe

$$\hat{u}_i = \hat{l}'_i \underline{x} = \hat{l}_{i1}x_1 + \hat{l}_{i2}x_2 + \dots + \hat{l}_{ip}x_p,$$

gdzie \hat{l}_i są \underline{S} -ortonormalnymi wektorami spełniającymi równanie

$$(\underline{B} - \nu_i \underline{S}) \hat{l}_i = \underline{0}, \quad i=1,2,\dots,v.$$

Powyższe równanie zapisać można następująco:

$$(\underline{B} - \lambda_i \underline{W}) \hat{l}_i = \underline{0},$$

gdzie $\lambda_i = (N-k)^{-1} \nu_i$, $i=1,2,\dots,v$.

Stąd wniosek, że nie ma znaczenia czy w konstrukcji zmiennych dyskryminacyjnych z próby posłużymy się macierzami \underline{B} i \underline{S} , czy też macierzami \underline{B} i \underline{W} .

4.2. Klasyfikacja obserwacji

Załóżmy, że w populacji π_1 obserwujemy wektor losowy \underline{x}_1 o p -wymiarowym rozkładzie normalnym z wektorem wartości oczekiwanych μ_1 i dodatnio określoną macierzą kowariancji $\underline{\Sigma}_1$, $i=1,2,\dots,k$.

Mamy obserwację \underline{x} , którą chcemy zaklasyfikować do jednej z k populacji $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_k$.

Zgodnie z metodą teorio-decyzyjną obserwację \underline{x} klasyfikujemy do populacji π_1 wówczas, gdy

$$g_1(\underline{x}) = \max_{1 \leq j \leq k} g_j(\underline{x}),$$

gdzie $g_1(\underline{x})$ jest kwadratową funkcją klasyfikującą postaci

$$g_1(\underline{x}) = -\frac{1}{2}(\underline{x}-\mu_1)' \underline{\Sigma}_1^{-1}(\underline{x}-\mu_1) - \frac{1}{2} \ln |\underline{\Sigma}_1| + \ln q_1,$$

q_1 jest prawdopodobieństwem a priori zdarzenia, że obserwacja

\underline{x} pochodzi z populacji π_i , $i = 1, 2, \dots, k$.

W przypadku szczególnym, gdy $\underline{\sum}_1 = \dots = \underline{\sum}_k = \underline{\sum}$, funkcja $q_i(\underline{x})$ przyjmuje postać

$$g_i^*(\underline{x}) = (\underline{x} - \frac{1}{2} \underline{\mu}_i)' \underline{\sum}^{-1} \underline{\mu}_i + \ln q_i, \quad i=1, 2, \dots, k.$$

W praktyce na ogół nie znamy parametrów populacji i posługujemy się ich estymatorami.

Nieobciążony estymator kwadratowej funkcji klasyfikującej $g_i(\underline{x})$ ma postać:

$$\hat{g}_i(\underline{x}) = -\frac{1}{2} \left[\frac{N_i - p - 2}{N_i - 1} D_i^2(\underline{x}) + \ln |\underline{S}_i| - \right. \\ \left. - h_1(p, N_i) - h_2(p, N_i) + \ln q_i \right],$$

gdzie \bar{x}_i i \underline{S}_i są zwykłymi nieobciążonymi estymatorami parametrów $\underline{\mu}_i$ i $\underline{\sum}_i$ obliczonymi na podstawie N_i obserwacji pobranych z populacji π_i ,

$$D_i^2(\underline{x}) = (\underline{x} - \bar{x}_i)' \underline{S}_i^{-1} (\underline{x} - \bar{x}_i),$$

$$h_1(p, N_i) = \sum_{j=1}^p \Psi \left[\frac{1}{2} (N_i - j) \right] - p \ln (N_i - 1),$$

$$h_2(p, N_i) = p(N_i - 1) / N_i (N_i - p - 2),$$

$$\Psi(x) = \frac{d \ln \Gamma(x)}{dx} \quad (\text{pochodna logarytmiczna funkcji gamma}),$$

$$i=1, 2, \dots, k.$$

Nieobciążonym estymatorem liniowej funkcji klasyfikującej $g_i^*(\underline{x})$ jest estymator postaci

$$\hat{g}_i^*(\underline{x}) = -\frac{1}{2} \left[k_1(p, N) d_i^2(\underline{x}) + k_1^{-1}(p, N) k_2(p, N_i) \right] + \ln q_i,$$

gdzie \underline{S} jest estymatorem macierzy $\underline{\sum}$,

$$k_1(p, N) = \frac{N - k - p - 1}{N - k}, \quad k_2(p, N_i) = \frac{p}{N_i},$$

$$N = \sum_{j=1}^k N_j, \quad i = 1, 2, \dots, k.$$

4.3. Test istotności odległości Mahalanobisa

Kwadrat odległości Mahalanobisa między populacjami $N(\mu_i, \Sigma)$ oraz $N(\mu_j, \Sigma)$ wyraża się wzorem

$$\Delta_{ij}^2 = (\mu_i - \mu_j)' \Sigma^{-1} (\mu_i - \mu_j), \quad i, j = 1, 2, \dots, k, \quad j \neq i.$$

Założmy, że z każdej populacji pobraliśmy próbę wielkości N_i , $i = 1, 2, \dots, k$. Wówczas estymatorem wyrażenia Δ_{ij}^2 jest wyrażenie

$$\hat{\Delta}_{ij}^2 = (\bar{x}_i - \bar{x}_j)' \underline{S}^{-1} (\bar{x}_i - \bar{x}_j),$$

gdzie \bar{x}_i oraz \underline{S} są estymatorami μ_i oraz Σ odpowiednio, $i, j = 1, 2, \dots, k$, $j \neq i$.

Statystykę $\hat{\Delta}_{ij}^2$ przekształcamy w statystykę T_{ij}^2 :

$$T_{ij}^2 = \frac{N_i N_j}{N_i + N_j} \Delta_{ij}^2, \quad i, j = 1, 2, \dots, k.$$

Zgodnie z procedurą jednoczesnego testowania wielu hipotez, wartość krytyczna dla wszystkich statystyk T_{ij}^2 , $i, j = 1, 2, \dots, k$, $j \neq i$ ma postać

$$T_{\alpha}^2 = (N-k) \left[\left(\frac{(k-1)p}{ms-2\lambda} F_{\alpha} + 1 \right)^s - 1 \right], \quad \text{gdzie } m = N-1 - \frac{k+p}{2},$$

$$s = \sqrt{\frac{(k-1)^2 p^2 - 4}{(k-1)^2 + p^2 - 5}}, \quad \lambda = \frac{1}{4} [(k-1)p - 2],$$

$$F_{\alpha} = F_{(k-1)p, ms-2\lambda}(\alpha), \quad N = N_1 + N_2 + \dots + N_k.$$

Wyrażenie $ms-2\lambda$ nie musi być liczbą całkowitą. Bezpiecznie jest za liczbę stopni swobody mianownika przyjmować $[ms-2\lambda]$. W szczególności dla $p=2$ (czyli dla dwóch obserwowanych zmiennych) mamy:

$$(k-1)p = 2(k-1), \quad ms-2\lambda = 2(N-k-1), \quad s = 2,$$

$$F_{\alpha} = F_{2(k-1), 2(N-k-1)}(\alpha).$$

Wysuwamy hipotezę $H_0: \Delta_{ij}^2 = 0$, dla wszystkich $i, j = 1, 2, \dots, k$, $j \neq i$.

Hipotezę H_0 możemy zapisać następująco:

$$H_0 = \prod_{\substack{i,j \\ i \neq j}} H_{ij}, \quad \text{gdzie } H_{ij} : \Delta_{ij}^2 = 0.$$

Hipotezę H_{ij} odrzucamy wówczas, gdy

$$T_{ij}^2 > T_{\alpha}^2, \quad i, j = 1, 2, \dots, k, \quad j \neq i.$$

Hipotezę H_0 odrzucamy wówczas, gdy chociaż jedna z hipotez H_{ij} zostanie odrzucona.

Tablica odległości Mahalanobisa jest wykorzystywana do konstrukcji dendrytu. Usunięcie z dendrytu połączeń odpowiadających odległościom Mahalanobisa istotnie różniącym się od zera daje podział dendrytu na jednorodne podgrupy populacji.

5. Wyniki analizy

5.1. Zróżnicowania fonematyczne

Na ryc. 1 przedstawiono średnie wektory $[\overline{\log F_1}, \overline{\log F_2}]$ dla każdego fonemu i każdego głosu. Widoczne jest, że zróżnicowanie średnich wektorów jest największe w głosie WJ, a najmniejsze w głosie PD. Dla każdego głosu punkty odpowiadające średnim wektorom poszczególnych idiofonemów połączone pętlami. W Tabelicy 2A umieszczono przeliczone na skalę liniową średnie wartości częstotliwości formantowych. Wartości te nie są ściśle porównywalne z uzyskanymi poprzednio dla samogłosek stacjonarnych (Jassem 1973 str.209), ani dla samogłosek w typowych zdaniach (Jassem, Dyczkowski i Szybista 1976 str. 139), ponieważ z wyjątkiem WJ badane były inne głosy oraz ponieważ obecne średnie są geometryczne, podczas gdy w tamtych pracach operowano liniową skalą częstotliwości, zatem średnie były arytmetyczne. Jednak orientacyjnie można stwierdzić, że tak ryc. 1, jak i Tab. 2A wykazują bardzo dobrą zgodność z poprzednio uzyskanymi średnimi przy uwzględnieniu różnicy w typie materiału (por. Łobacz 1974). Na ryc. 2 oraz w ostatnich dwu kolumnach Tab. 2A widnieją średnie dla danych ze wszystkich głosów łącznie.

Tablica 2B zawiera wartości elementów macierzy sum kwadratów i sum iloczynów dla zmienności między średnimi wektorami

samogłosek (macierze typu \underline{B}) oraz elementy ogólnych macierzy zmienności wewnątrz poszczególnych idiofonemów (typ \underline{W}). Wartości poszczególnych elementów nie różnią się drastycznie pomiędzy poszczególnymi osobami. Zwraca jednak uwagę fakt, że dla WJ $s_{11} < s_{22}$ między samogłoskami, podczas gdy dla pozostałych osób oraz przy połączonych głosach (gdzie wartości wszystkich elementów są wyraźnie większe) $s_{11} > s_{22}$. Ten odwrotny kierunek znaku nierówności znajduje odbicie w wynikach analizy dyskryminacyjnej.

Tablica 2C zawiera elementy macierzy kowariancji dla 4 osób \times 6 samogłosek = 24 idiofonemów. Wartości te, wraz z wartościami średnich wektorów wykorzystano dla wykreślenia elips ufności dla wszystkich idiofonemów, które widnieją na ryc. 3.

Dla stwierdzenia możliwości ewentualnego zredukowania liczby zmiennych do jednej oraz przeprowadzenia analizy dyskryminacyjnej obliczono wartości własne λ_1 i λ_2 macierzy $\underline{W}^{-1}\underline{B}$ dla różnic między samogłoskami w poszczególnych głosach oraz dla przypadku głosów połączonych. Wartości te umieszczono w Tab. 3. Przekonują one, że redukcja do jednej zmiennej jest niemożliwa, jako że λ_1 wyrażona w procentach zawiera się w granicach 58 do 74%, a zatem jedna tylko zmienna dyskryminacyjna nie pozwoliłaby zadowalająco rozróżnić samogłosek ani w poszczególnych głosach, ani przy głosach połączonych.

Tab. 4 zawiera współczynniki determinacji między zmiennymi pierwotnymi a zmiennymi dyskryminacyjnymi I i II uzyskanymi po obliczeniu wektorów własnych odpowiadających wartościom własnym w Tab. 3. Liczby w Tab. 4 wskazują, że głos WJ różni się od pozostałych: Podczas gdy w pozostałych głosach (jak i w przypadku głosów połączonych) pierwsza zmienna dyskryminacyjna jest silnie skorelowana z częstotliwością F_1 , a druga zmienna dyskryminacyjna z F_2 , (ponad 99% dla korelacji (I, F_1) i ponad 80% dla (II, F_2) w głosach RC i AM), w głosie WJ zachodzą niemal równie silne korelacje (II, F_1) , (I, F_2) . Nie można na razie odpowiedzieć na pytanie, czy fakt ten jest związany z fonetycznym wykształceniem WJ oraz z większym zróżnicowaniem samogłosek w tym głosie. Relacje między zmiennymi I i II oraz F_1 i F_2 znajdują odbicie na ryc. 4 - 7. Układ punktów odpowiadających poszczególnym samogłoskom na płaszczyźnie (I, II) jest podobny,

jak na rycinie 1: oś I (F_1) odpowiada relacji samogłoska przymknięta - otwarta (czyli niska - szeroka), a oś II (F_2) - relacji samogłoska przednia - tylna w głosach RC, PD i AM oraz w wypadku głosów połączonych. Natomiast w głosie WJ położenie samogłosek w układzie (I,II) odpowiada, w stosunku do układu (F_1, F_2) obrotowi o -90° oraz odwróceniu lustrzanemu.

Tablice 5-9 pokazują odległości Mahalanobisa między samogłoskami dla poszczególnych głosów oraz dla głosów połączonych. W głosie WJ odległości Mahalanobisa są na ogół większe niż w pozostałych głosach i na podstawie kryterium T^2 Hotellinga wszystkie są istotne na poziomie $= 0.05$. To ostatnie dotyczy również głosu AM. Natomiast w głosach RC i PD odległość między /i/ a /e/ nie jest istotna statystycznie na tym poziomie. . Chociaż liczebność prób w przypadku połączenia głosów jest ok. 4 razy większa niż dla głosów pojedynczych, jednak nie równoważy to zwiększenia rozrzutu wewnątrzgrupowego spowodowanego różnicami między głosami, wobec czego, jak widać z Tab. 9, prawie wszystkie odległości są mniejsze niż odpowiednie odległości w poszczególnych głosach. Niemniej nawet dla połączonych głosów tylko jedna spośród 15 odległości nie jest istotna. Tablice Mahalanobisa umożliwiają konstrukcję dendrytów widocznych na ryc. 4 - 7, które pokazują połączenia między najbliższymi, tj. najslabiej rozróżnialnymi samogłoskami. Tutaj znów głos WJ odbiega od pozostałych. Jak widać z ryc. 4, dendryt łączy samogłoski w układ /i-i-e-a-o-u/, dokładnie taki sam, jak w przypadku samogłosek stacjonarnych (por. Jassem, Krzyśko i Dyczkowski 1972 str. 70 i 71). Wydaje się to dodatkowo wskazywać na dokładniejszą artykulację osoby WJ.

Rozpoznawanie samogłosek lub głosów nie wchodzi w zasadzie w zakres tematyki niniejszej pracy, która bada tylko ich rozróżnialność (jako etap wstępny rozpoznawania), jednak dla celów orientacyjnych dokonano rozpoznawania trajektorii utworzonych przez połączenie punktów odpowiadających dwuzmiennym obserwacjom dla każdej wypowiedzianej samogłoski na płaszczyźnie ($\log F_1, \log F_2$) podzielonej funkcjami dyskryminacyjnymi na podprzestrzenie identyfikacyjne stosując analogiczną procedurę jak w pracy Jassem, Dyczkowski i Szybista 1976. Uzyskane obecnie wyniki przedstawiono w Tablicach 10-17. Rozpoznawania doko-

nano na podstawie "map" zbudowanych dla danego głosu (Tablice 10-13) oraz na podstawie "mapy" wspólnej dla wszystkich głosów. (Tab. 14-17). Tablica 18 podsumowuje uzyskane wyniki. Zgodnie z rezultatami analizy dyskryminacyjnej samogłoski w głosie WJ rozpoznaje się najlepiej, a w głosie PD najgorzej, chociaż wyniki są wszystkie bardzo wysokie. Stosowanie wspólnego wzorca obniża wyniki rozpoznawania we wszystkich głosach.

5.2. Zróźnicowania międzyosobnicze

W Tab. 19 umieszczono wartości własne macierzy $\underline{W}^{-1}\underline{B}$ dla różnic między głosami oddzielnie dla każdego fonemu oraz przy połączeniu danych ze wszystkich głosek w obrębie każdego głosu. Znamienne jest to, że samogłoski przednie (z maksymalną wartością F_1 dla danej wartości F_2), mianowicie /i/ oraz /e/ pozwalają rozróżnić głosy przy pomocy tylko jednej zmiennej dyskryminacyjnej. Również przy lekko tylko cofniętym /ɛ/ λ_1 wyrażona w procentach wynosi 91.7. Najmniej różnią się obie wartości własne dla /a/. Badane głosy umieszczono dla każdego fonemu na płaszczyźnie o współrzędnych I i II (pierwszej i drugiej zmiennej dyskryminacyjnej) na ryc. 8 - 14, które potwierdzają wyrażony przez względne wartości λ udział pierwszej i drugiej zmiennej: W przypadku /i/ oraz /e/ głosy leżą praktycznie na jednej prostej równoległej do osi I. Bezwzględne wartości λ_1 i λ_2 są znacznie mniejsze, gdy samogłoski zostaną połączone w obrębie każdego głosu. Na ryc. 2 umieszczono również punkty odpowiadające poszczególnym głosom przy uśrednieniu poprzez wszystkie samogłoski. Wartości formantów takiej "uśrednionej" (neutralnej) samogłoski widnieją w Tablicy 20 (po przeliczeniu na skalę liniową). Są one zbliżone do teoretycznych wartości $F_1=500\text{Hz}$, $F_2=1500\text{ Hz}$ dla artykulacyjnego toru samogłoskowego o długości 175 mm i samogłoski neutralnej (Fant 1960 str. 48 i dal).

Tablica 21 ukazuje związki między zmiennymi I i II a zmiennymi pierwotnymi $\log F_1$ i $\log F_2$ w układzie danych dla zbadania zróźnicowań między głoskami. Dla fonemów /i/ oraz /ɛ/ zachodzi silna korelacja I z F_2 oraz II z F_1 , a dla samogłosek /o/ oraz /u/ I jest silniej zależna od F_1 , a II od F_2 .

Tablica 22 ukazuje odległości Mahalanobisa między głosami dla każdego fonemu oddzielnie oraz przy połączeniu wszystkich

idiofonemów. Wartości te są przeważnie niższe niż w Tab. 5-8, ale tylko 2 odległości na 36 dla poszczególnych fonemów nie są istotne na poziomie $\alpha = 0.05$ (kryterium T^2 Hotellinga). Natomiast po połączeniu wszystkich idiofonemów, spośród 6 odległości 2, (tj. już 1/3) są nieistotne. Największe odległości przypadają między głosami dla fonemu /i/, który zatem najlepiej różnicuje głosy.

6. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie pomiarów i ich statystycznej analizy dyskryminacyjnej stwierdzono, iż częstotliwości dwóch najniższych formantów samogłoskowych zależne są w silnym stopniu zarówno od różnicowań fonematycznych, jak i międzyosobniczych. Zmienność fonematyczna (lingwistyczna) jest jednak silniejsza i przy liczbie fonemów zbliżonej do liczby głosów, częstotliwości F_1 i F_2 silnie różnicują fonemy niż głosy. Niemniej siła dyskryminacyjna zmiennych F_1 i F_2 branych łącznie jest dla głosów wystarczająca, by przy niewielkiej ich liczbie pozwolić na bardzo dobre ich rozróżnienie. Szczególnie silnie głosy różnią się w przypadku samogłoski /i/. Przy dostatecznie dużej liczbie pomiarów (rzędu kilkuset, co odpowiada ok. 60 dźwiękom samogłoskowym w ciągłej mowie), F_1 i F_2 uśrednione poprzez wszystkie samogłoski, choć bardzo zbliżone, mają jeszcze dostateczną moc dyskryminacyjną, by pozwolić rozróżnić między sobą większość głosów w zbiorze o liczebności rzędu ok. 5. Dla liczniejszego zbioru głosów liczba obserwacji (pomiarów) musiałaby być odpowiednio wyższa.

W przeciwieństwie do zdyskredytowanej już ("On the theory... 1979) metody rozpoznawania głosów na podstawie w i z u a l n e j i n i e s f o r m a l i z o w a n e j, s u b i e k t y w n e j oceny spektrogramów, pomiary zmiennych w czasie wartości F_1 i F_2 samogłosek, łatwe do wykonania na zapisach spektrograficznych lub uzyskane z analogowej albo cyfrowej ekstrakcji stanowią jedną z o b i e k t y w n y c h cech rozróżniających głosy. Procedura rozpoznawania głosów na podstawie F_1 i F_2 mogłaby znaleźć zastosowanie w kryminalistyce lub łączności w układzie człowiek-maszyna. Prace nad rozpoznaniem głosów dla celów łącznościowych, rozpoczęte w Pracowni

Fonetyki Akustycznej na przełomie lat 60-tych i 70-tych
(Caliński i Kaczmarek 1968, Jassem 1968, Jassem Krzyśko i
Dyczkowski 1971) zostały obecnie wznowione.

Tablica 1
Liczba pomiarów

	i	z	e	a	o	u	razem
WJ	49	43	55	63	62	45	317
RC	54	47	58	69	67	58	353
PD	41	40	57	55	56	43	292
AM	49	41	58	62	60	45	315
razem	193	171	228	249	245	191	1277

Tablica 2A
Średnie wartości częstotliwości formantowych

	WJ		RC		PD		AM		połączone głosy	
	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂	F ₁	F ₂
i	271	2519	274	2350	290	1905	274	2178	277	2244
ɨ	367	2002	358	1831	348	1601	387	1881	367	1827
e	436	2084	394	1932	358	1747	415	1977	399	1930
a	733	1424	763	1381	638	1299	651	1487	698	1399
o	545	1091	615	1132	456	1131	501	1280	530	1156
u	336	926	370	894	351	997	381	1081	360	968

Tablica 2B

Wartości elementów macierzy sum kwadratów
i sum iloczynów dla zróżnicowań między sa-
mogłoskami

osoba	Między samogłoskami			Wewnątrz samogiosek		
	s_{11}	s_{12}	s_{22}	s_{11}	s_{12}	s_{22}
WJ	6.68	-2.79	7.40	1.14	-0.33	0.96
RC	8.40	-3.70	6.86	0.93	-0.37	1.76
PD	3.60	-1.44	2.87	0.57	-0.14	0.64
AM	4.36	-1.84	3.50	0.61	-0.23	0.83
połącz- głosy	22.25	-9.64	19.98	4.44	-0.99	5.41

Tablica 2C

Elementy macierzy kowariancji dla poszczególnych idiofonemów
(Wartości należy pomnożyć przez 10^{-3})

głos	samogłoska	s_{11}	s_{22}	s_{12}
WJ	i	1.58	0.20	-0.28
	ɛ	0.78	0.45	-0.07
	e	4.51	1.61	-1.84
	a	4.96	1.17	-0.60
	o	7.15	5.32	-1.83
	u	0.90	10.28	-0.99
RC	i	1.60	0.18	0.01
	ɛ	0.49	0.51	0.22
	e	4.10	1.76	-1.43
	a	2.54	1.51	-1.04
	o	5.60	17.18	-2.05
	u	0.99	7.49	-1.42
PD	i	1.01	0.28	-0.00
	ɛ	0.50	1.15	-0.16
	e	1.07	1.52	-0.81
	a	3.77	0.63	-0.47
	o	4.09	2.89	-0.85
	u	0.45	7.30	0.02
AM	i	1.60	0.11	0.13
	ɛ	1.21	0.57	0.24
	e	1.69	0.72	-0.45
	a	3.55	0.47	-0.66
	o	2.19	4.22	-2.18
	u	0.92	11.07	-0.30

Tablica 3

Wartości własne macierzy $\underline{W}^{-1}\underline{B}$ dla różnic między samogłoskami

	λ_1		λ_2	
	wartość	%	wartość	%
WJ	7.71	58.5	5.46	41.5
RC	9.01	73.5	3.24	26.5
PD	6.69	65.1	3.59	34.9
AM	7.20	66.5	3.63	33.5
głosy połą- czone	5.44	66.0	2.81	34.0

Tablica 4

Współczynniki determinacji między zmiennymi pierwotnymi a zmiennymi dyskryminacyjnymi dla różnic między samogłoskami

		I	II
WJ	F ₁	0.188	0.812
	F ₂	0.983	0.017
RC	F ₁	0.997	0.003
	F ₂	0.114	0.886
PD	F ₁	0.891	0.109
	F ₂	0.288	0.712
AM	F ₁	0.993	0.007
	F ₂	0.158	0.842
połą- czone głosy	F ₁	0.836	0.164
	F ₂	0.338	0.662

Tablica 5
Odległości Mahalanobisa
między samogłoskami. Głos WJ

	i	ɨ	e	a	o
ɨ	2.46	-	-	-	-
e	3.43	1.44	-	-	-
a	7.52	5.11	4.19	-	-
o	7.24	4.95	5.05	3.59	-
u	7.86	6.57	7.51	7.77	4.28

Tablica 6
Odległości Mahalanobisa
między samogłoskami. Głos RC

	i	ɨ	e	a	o
ɨ	2.40	-	-	-	-
e	3.04	n.s. 0.98	-	-	-
a	8.55	6.28	5.51	-	-
o	7.20	4.79	4.34	2.54	-
u	5.91	4.46	5.06	7.55	5.05

Tablica 7
Odległości Mahalanobisa
między samogłoskami. Głos PD

	i	ɨ	e	a	o
ɨ	2.37	-	-	-	-
e	2.09	n.s. 0.81	-	-	-
a	7.91	5.66	5.82	-	-
o	5.87	3.59	4.25	3.88	-
u	5.97	4.53	5.34	6.99	3.12

Tablica 8
Odległości Mahalanobisa
między samogłoskami. Głos AM

	i	ɨ	e	a	o
ɨ	3.36	-	-	-	-
e	4.10	0.98	-	-	-
a	8.47	5.11	4.51	-	-
o	6.49	3.59	3.70	3.36	-
u	6.02	4.94	5.67	6.96	3.60

Tablica 9
Odległości Mahalanobisa
między samogłoskami. Połączone głosy

	i	ɨ	e	a	o
ɨ	2.29	-	-	-	-
e	2.73	n.s. 0.80	-	-	-
a	7.02	4.78	4.30	-	-
o	5.92	3.71	3.69	2.65	-
u	5.65	4.34	4.90	6.00	3.36

Tablica 10
Klasyfikacja samogłosek. Głos WJ
wypowiedziane

	i	ɨ	e	a	o	u
i	7	-	-	-	-	-
ɨ	-	6	1	-	-	-
e	-	-	6	-	-	-
a	-	-	-	7	-	-
o	-	-	-	-	7	-
u	-	-	-	-	-	6

sklasyfikowane

Tablica 11
Klasyfikacja samogłosek. Głos RC
wypowiedziane

	i	ɨ	e	a	o	u
sklasyfikowane	7	-	-	-	-	-
ɨ	-	4	-	-	-	-
e	-	2	7	-	-	-
a	-	-	-	7	-	-
o	-	-	-	-	7	-
u	-	-	-	-	-	6

Tablica 12
Klasyfikacja samogłosek. Głos PD
wypowiedziane

	i	ɨ	e	a	o	u
sklasyfikowane	7	-	-	-	-	-
ɨ	-	3	1	-	-	-
e	-	3	6	-	-	-
a	-	-	-	7	-	-
o	-	-	-	-	7	-
u	-	-	-	-	-	6

Tablica 13
Klasyfikacja samogłosek. Głos AM
wypowiedziane

	i	ɨ	e	a	o	u
sklasyfikowane	i	7	-	-	-	-
ɨ	-	6	1		-	-
e	-		6	-	-	-
a	-	-	-	7		-
o	-	-	-	-	7	
u	-	-	-	-	-	6

Tablica 14
Klasyfikacja samogłosek. Głosy
połączone dla wzorców. Głos WJ
wypowiedziane

	i	ɨ	e	a	o	u
sklasyfikowane	i	7	-	-	-	-
ɨ	-	3	-	-	-	-
e	-	3	7	-	-	-
a	-	-	-	7		-
o	-	-	-	-	7	
u	-	-	-	-	-	6

Tablica 15
Klasyfikacja samogłosek. Głosy
połączone dla wzorców. Głos RC
wypowiedziane

	i	ɨ	e	a	o	u
sklasyfikowane	i	7	-	-	-	-
ɨ	-	5	4	-	-	-
e	-	1	3	-	-	-
a	-	-	-	7	-	-
o	-	-	-	-	7	-
u	-	-	-	-	-	7

Tablica 16
Klasyfikacja samogłosek. Głosy
połączone dla wzorców. Głos PD
wypowiedziane

	i	ɨ	e	a	o	u
sklasyfikowane	i	7	-	-	-	-
ɨ	-	6	7	-	-	-
e	-	-	-	-	-	-
a	-	-	-	7	-	-
o	-	-	-	-	6	-
u	-	-	-	-	1	6

Tablica 17
Klasyfikacja samogłosek. Głosy
połączone dla wzorców. Głos AM
wypowiedziane

	i	ɨ	e	a	o	u
sklasyfikowane	i	7	-	-	-	-
	ɨ	-	3	-	-	-
	e	-	3	7	-	-
	a	-	-	-	7	-
	o	-	-	-	-	7
	u	-	-	-	-	-

Tablica 18
Poprawność rozpoznawania
trajektorii samogłoskowych
(w procentach)

	własny wzorzec	wspólny wzorzec
WJ	98	93
RC	95	88
PD	90	80
AM	98	93

Tablica 19

Wartości własne macierzy
 $W^{-1}B$ dla różnic między
głosami

	λ_1		λ_2	
	wartość	%	wartość	%
i	10.20	99.9	0.011	0.1
ɛ	2.05	91.7	0.187	8.3
e	2.24	99.9	0.003	0.1
a	0.715	75.8	0.229	24.2
o	0.506	85.4	0.087	14.6
u	0.696	89.6	0.081	10.4
połączone samo- głoski	0.051	89.9	0.006	10.1

Tablica 20

Częstotliwości formantów uśrednione poprzez wszystkie samogłoski w Hz

	F_1	F_2
WJ	441.7	1553.8
RC	452.0	1494.2
PD	404.5	1399.6
AM	431.5	1592.2

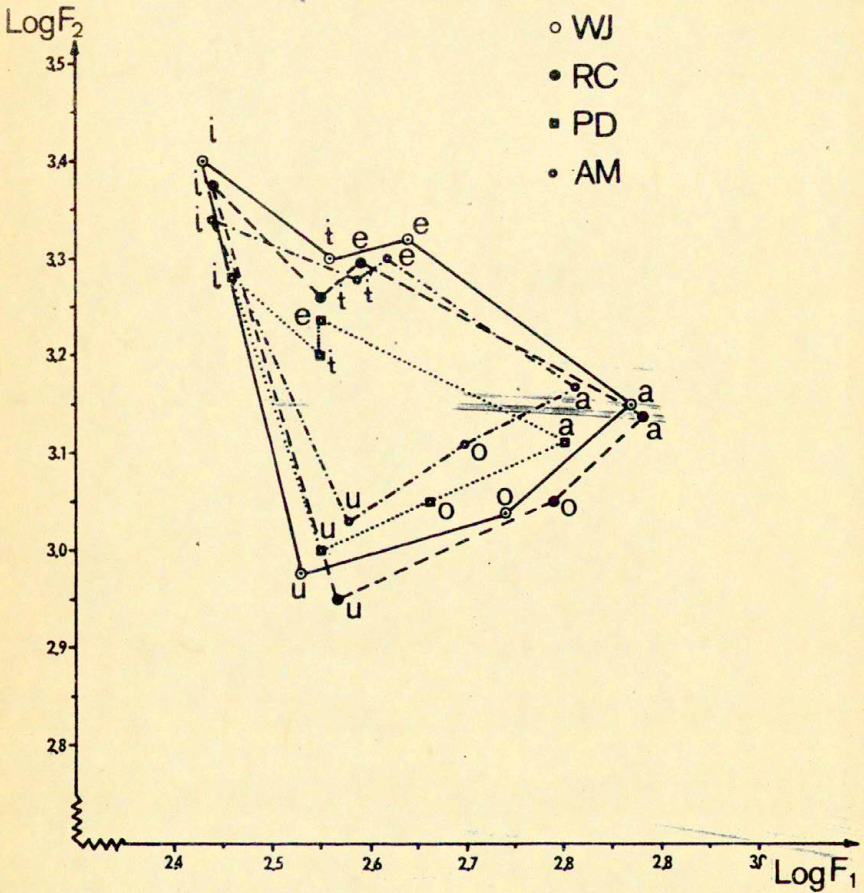
Tablica 21

Współczynniki determinacji między zmiennymi pierwotnymi a zmiennymi dyskryminacyjnymi dla różnic między głosami

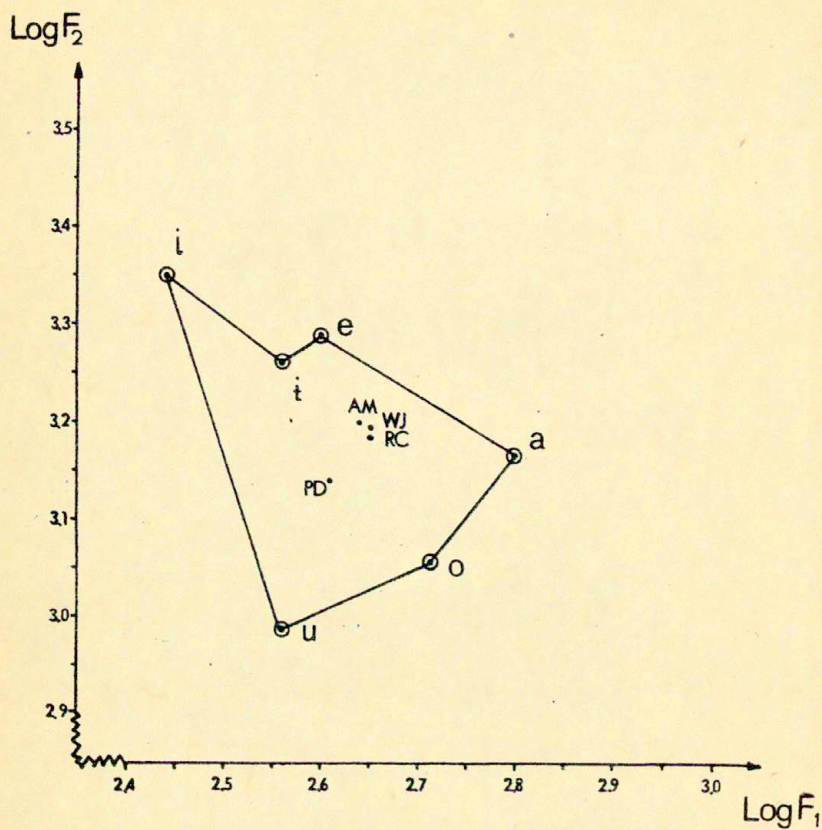
		I	II
i	F ₁	0.006	0.994
	F ₂	0.996	0.004
ɨ	F ₁	0.033	0.967
	F ₂	0.902	0.098
e	F ₁	0.159	0.841
	F ₂	0.248	0.752
a	F ₁	0.154	0.846
	F ₂	0.454	0.546
o	F ₁	0.952	0.048
	F ₂	0.007	0.993
u	F ₁	0.749	0.251
	F ₂	0.050	0.950
samo- głoski połą- czone	F ₁	0.213	0.787
	F ₂	0.367	0.633

Tablica 22
 'Odległości Mahalanobisa
 między głosami

		WJ	RC	PD
i	RC	2.21	-	-
	PD	8.87	6.66	-
	AM	4.64	2.42	4.24
z	RC	1.62	-	-
	PD	3.88	2.28	-
	AM	1.27	1.38	3.16
e	RC	1.89	-	-
	PD	4.08	2.19	-
	AM	1.11	n.s. 0.79	2.96
a	RC	n.s. 0.44	-	-
	PD	2.12	2.00	-
	AM	0.90	1.29	2.15
o	RC	0.86	-	-
	PD	1.14	1.97	-
	AM	0.84	1.30	1.02
u	RC	1.47	-	-
	PD	0.85	0.85	-
	AM	2.31	1.13	1.47
samo- głoski poią- czone	RC	n.s. 0.14	-	-
	PD	0.55	0.49	-
	AM	n.s. 0.09	0.22	0.57



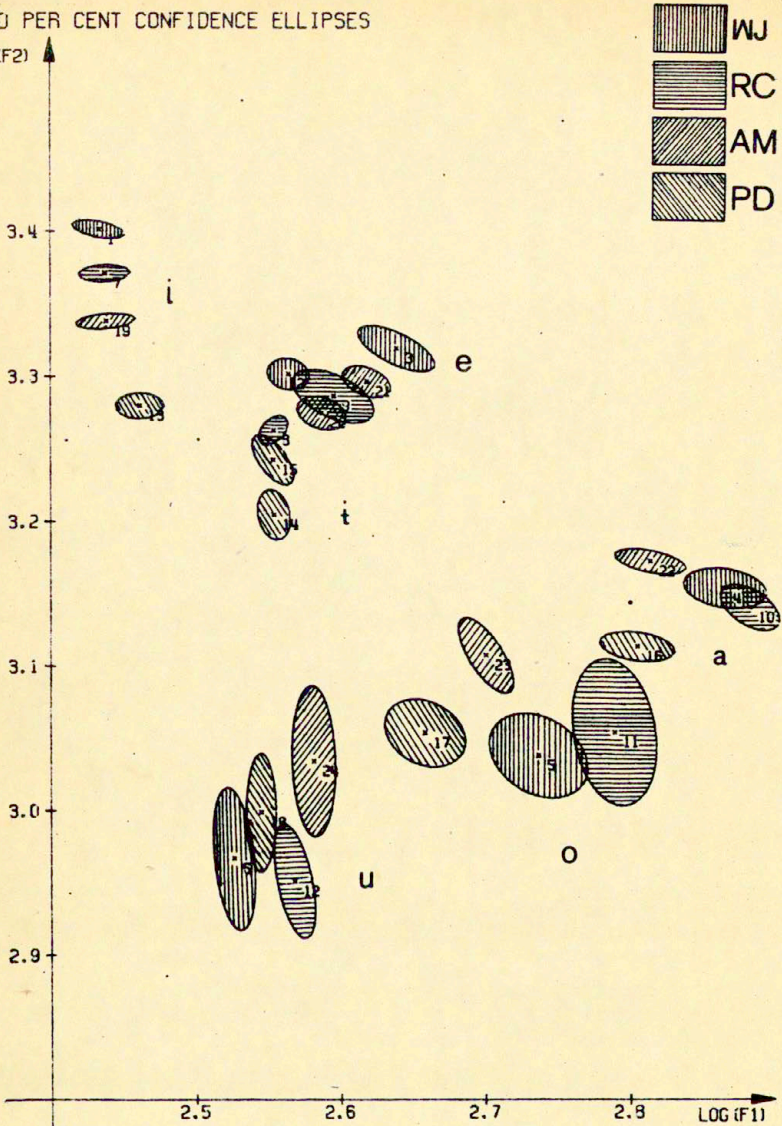
- Ryc. 1. Średnie częstotliwości formantowe F_1 i F_2 dla poszczególnych samogłosek i głósów.



Ryc. 2. Średnie częstotliwości formantów F_1 i F_2 dla poszczególnych samogłosek przy połączonych głosach.

99.0 PER CENT CONFIDENCE ELLIPSES

LOG (F2)



ryc. 3. Elipsy ufności dla idiofonemów na poziomie 99 % .

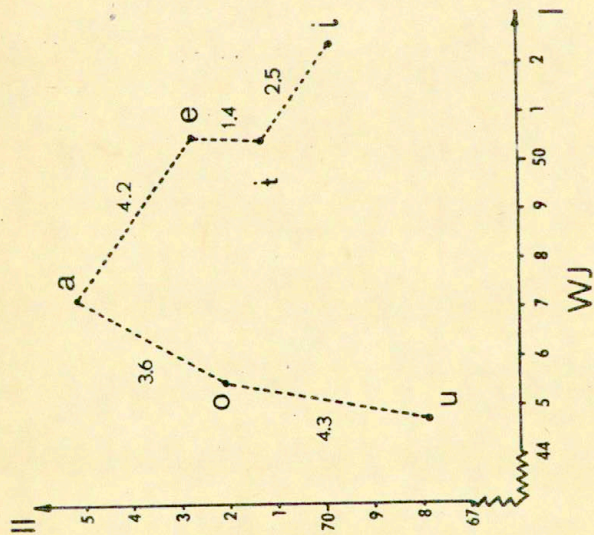


Fig. 4. Średnie wartości formantów samogłoskowych w płaszczyźnie zmiennych dyskryminacyjnych. Głos WJ.

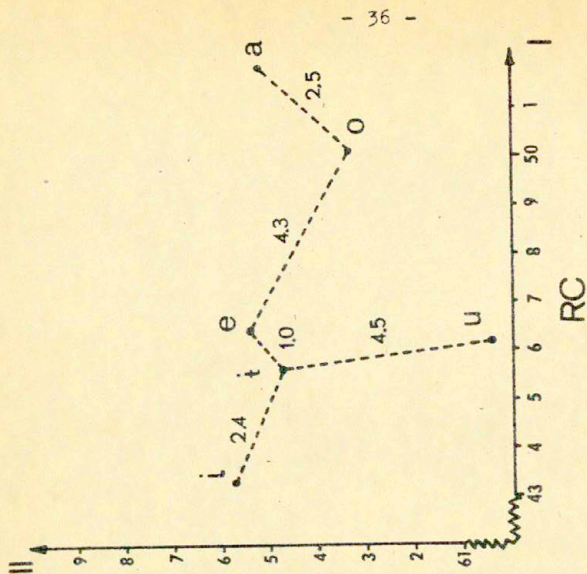
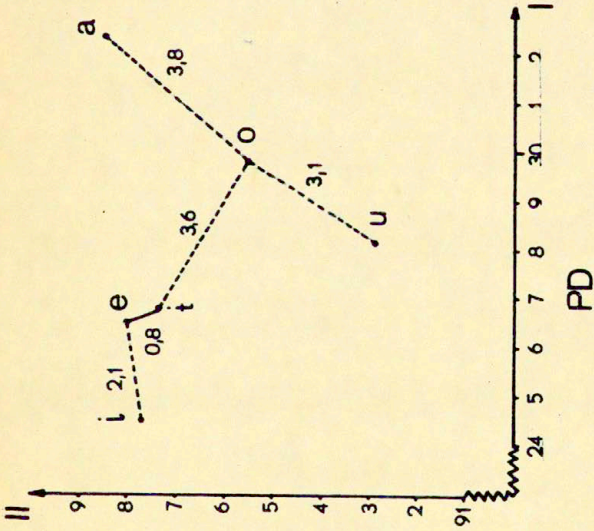
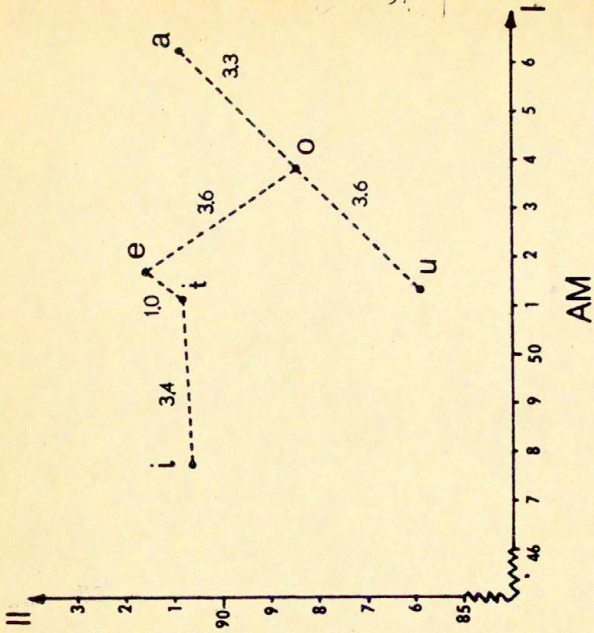


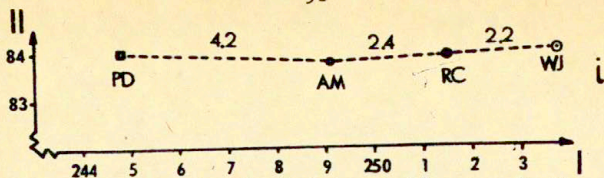
Fig. 5. Średnie wartości formantów samogłoskowych w płaszczyźnie zmiennych dyskryminacyjnych. Głos RC.



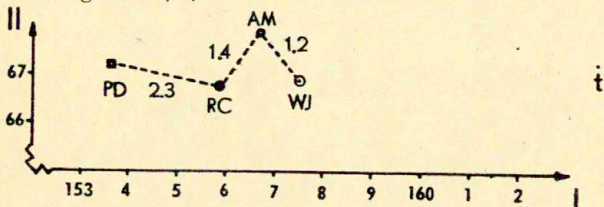
Ryc. 6. Średnie wartości formantów samogłoskowych w płaszczyźnie zmiennych dyskryminacyjnych. Głos PD.



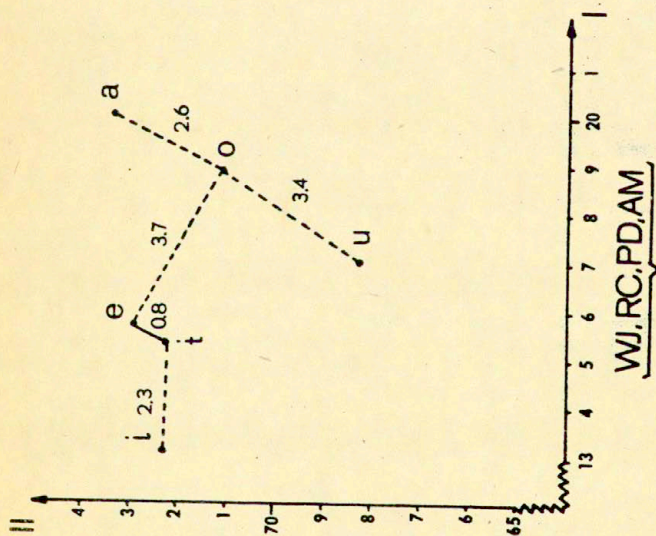
Ryc. 7. Średnie wartości formantów samogłoskowych w płaszczyźnie zmiennych dyskryminacyjnych. Głos AM.



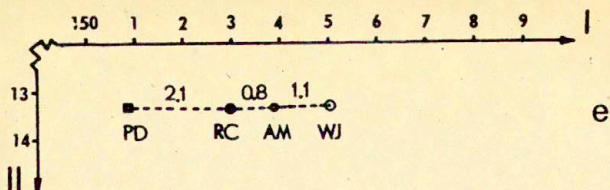
Ryc. 9. Średnie częstotliwości formantów samogłoskowych dla 4 głosew w płaszczyźnie zmiennych dyskryminacyjnych. Samogłoska /i/.



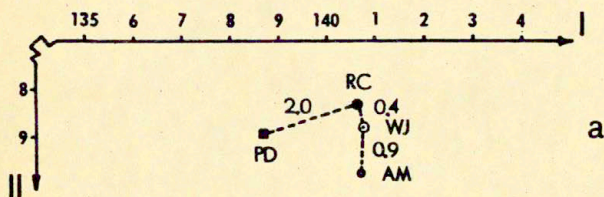
Ryc. 10. Średnie częstotliwości formantów samogłoskowych dla 4 głosew w płaszczyźnie zmiennych dyskryminacyjnych. Samogłoska /i/.



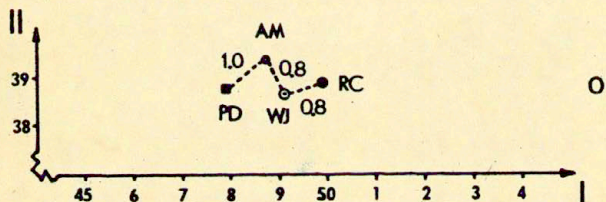
Ryc. 8. Średnie wartości formantów samogłoskowych w płaszczyźnie zmiennych dyskryminacyjnych. Głosy połączone.



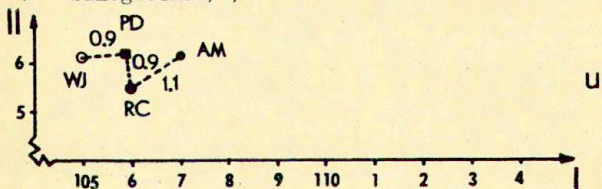
Ryc. 11. Średnie częstotliwości formantów samogłoskowych dla 4 głosów w płaszczyźnie zmiennych dyskryminacyjnych. Samogłoska /e/.



Ryc. 12. Średnie częstotliwości formantów samogłoskowych dla 4 głosów w płaszczyźnie zmiennych dyskryminacyjnych. Samogłoska /a/.



Ryc. 13. Średnie częstotliwości formantów samogłoskowych dla 4 głosów w płaszczyźnie zmiennych dyskryminacyjnych. Samogłoska /o/.



Ryc. 14. Średnie częstotliwości formantów samogłoskowych dla 4 głosów w płaszczyźnie zmiennych dyskryminacyjnych. Samogłoska /u/.

BIBLIOGRAFIA

- [1] CALIMSKI T. i KACZMAREK Z. (1968), Vowel formant frequencies as cues to speaker discrimination, *Speech Analysis and Synthesis 1* (W. Jassem, ed.) 9-41, PWN, Warszawa.
- [2] DELATTRE P., LIBERMAN A.M. i COOPER F.S. (1951), Voyelles synthétiques a deux formantes et voyelles cardinales, *Le Maître Phonétique* No. 96, 30-36.
- [3] FANT G. (1960), *Acoustic Theory of Speech Production*, Mouton, 's-Gravenhage.
- [4] JASSEM W., *Phonological segmental units in the speech signal, w: Form and Substance* (L.L. Hammerich, Roman Jakobson i E. Zwirner, eds) 181-189, Odense, (1971).
- [5] JASSEM W. (1968), Vowel formant frequencies as cues to speaker discrimination, *Speech Analysis and Synthesis 1* (W. Jassem, ed.) 9-41, PWN, Warszawa.
- [6] JASSEM W. (1973), *Podstawy fonetyki akustycznej*, PWN, Warszawa.
- [7] JASSEM W., DYCZKOWSKI A., SZYBISTA D. (1976), Semiautomatic classification and identification of vowels in typical phrases, *Speech Analysis and Synthesis 4* (W. Jassem, ed.) 135-145, PWN, Warszawa.
- [8] JASSEM W., KRZYŻKO M., DYCZKOWSKI A. (1971), Identyfikacja głosów przy zastosowaniu funkcji dyskryminacyjnych, *Prace IPPT*, No. 51/1971.
- [9] LADEFOGED P. (1967), *Linguistic Phonetics*, UCLA Working Papers in Phonetics, No.6, Los Angeles.
- [10] ŁOBACZ P., (1974), Wpływ tempa mowy na przebiegi formantów samogłosek polskich, *Prace IPPT*, No. 67/1974.
- [11] On the Theory and Practice of Voice Identification (praca zbiorowa) National Academy of Sciences, Washington D.C., 1979.