

Arkadiusz Banach, Maria Bryszewska, Jerzy Jatczak

LOKALIZACJA KIERUNKU SŁYSZENIA
A PRZESUNIĘCIA FAZY TONÓW KOHERENTNYCH

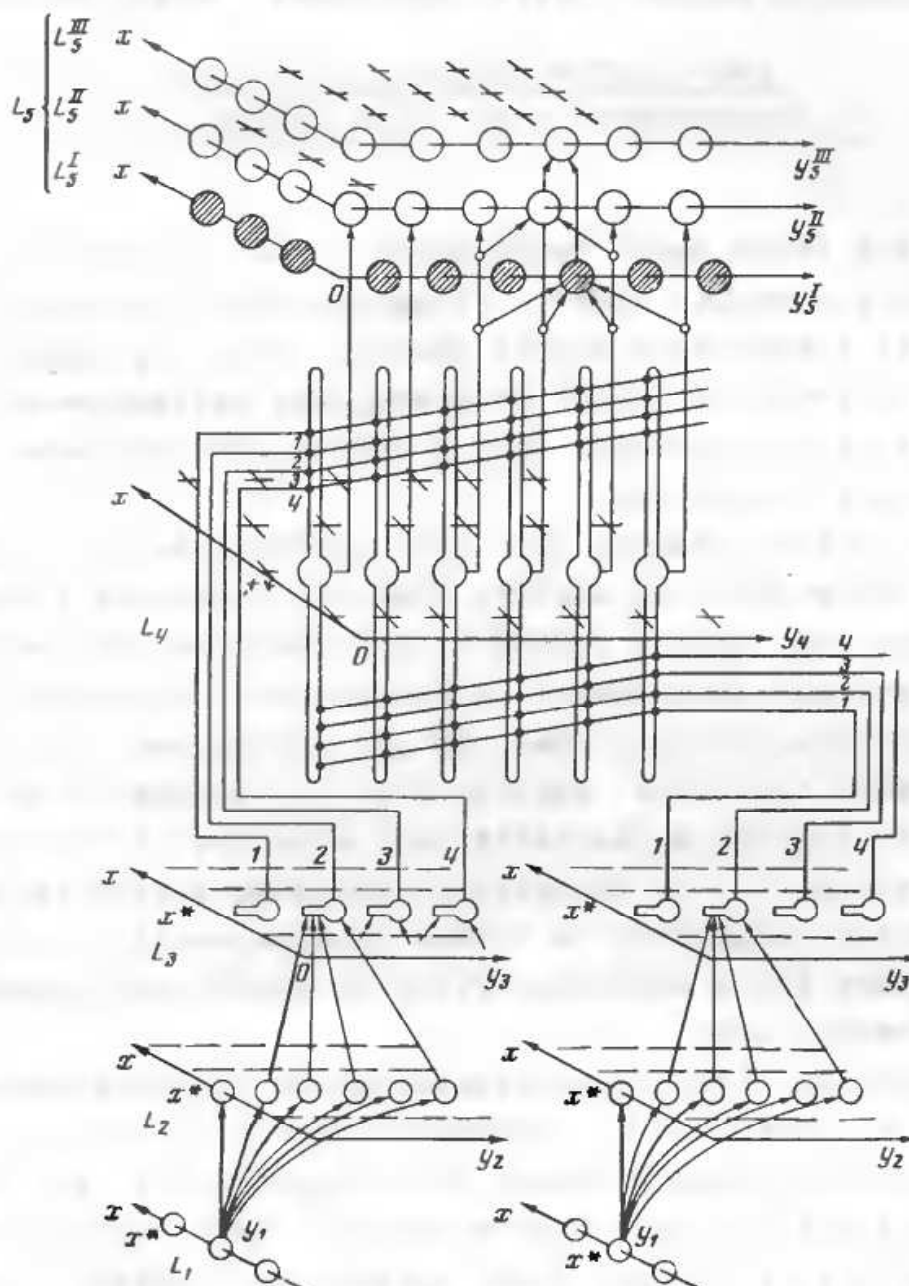
Różnica w fazie dwóch jednakowych tonów dochodzących do obojga uszu wywołuje rozmaite efekty. Przypuszczalnie leży ona u podstaw percepcyjnej lokalizacji źródła dźwięku przy częstościach poniżej 1200 Hz [2]. Innymi efektami percepcyjnymi występowania różnicy faz są wrażenia zmian wysokości tonu w jednym uchu względem drugiego, głośności tonu, barwy itp.

Najistotniejszą sprawą jest wykorzystanie metody przesunięć fazy tonów koherentnych do analizy zjawiska słyszenia kierunkowego. Badania tego typu mają z jednej strony charakter poznawczy, a z drugiej mogą znaleźć zastosowanie w diagnostyce lekarskiej. Pomimo że badania nad lokalizacją źródeł dźwięku prowadzone są od wielu lat przez fizyków, akustyków, lekarzy itp., to jednak do dnia dzisiejszego nie ma pełnego wyjaśnienia tego zjawiska. Z fizycznego punktu widzenia wydaje się, że lokalizacja kierunku słyszenia jest dokonywana przez żywe organizmy na drodze opracowywania informacji zawartych w różnicy faz i amplitudy sygnałów dźwiękowych dochodzących do lewego i prawego ucha.

W latach 1973-1977 na podstawie danych fizjologicznych i morfologicznych w pracach [4-6] zaproponowano biofizyczny model neuronowych struktur tej części układu słuchowego, która jest odpowiedzialna za określenie kierunku źródła dźwięku. Model zawiera dwa równoległe podukłady, z których jeden lokalizuje źródła impulsów krótkich, a drugi źródła impulsów długich. W przypadku dźwięków długich lokalizacja odbywa się na zasadzie pomiaru tylko międzyusznej różnicy natężeń, a w przypadku dźwięków krótkich zachodzi koszt pomiaru zarówno różnicy natężeń, jak i różnicy faz sygnałów dochodzących do lewego i prawego ucha.

Model składa się z pięciu poziomów oznaczonych odpowiednio L_1 , L_2 , L_3 , L_4 , L_5 , które schematycznie przedstawiono na rys. 1. Ele-

mentami poziomu pierwszego L_1 są receptory, będące wewnętrznymi komórkami rzęskowymi narządu Cortiego. Na wyjściu każdego elementu poziomu L_1 tworzy się potencjał elektryczny proporcjonalny do wielkości wychylenia odpowiedniego fragmentu błony podstawowej. Sygnał



Rys. 1. Neuronowy model części układu słuchowego odpowiedzialnej za lokalizację źródła dźwięku

rozkłada się na wiele równoległych kanałów, które różnią się między sobą bezwzględnością elementów na ich wejściach. Informacje o różnych co do długości i stromości czoła impulaach są przekazywane przez różne kanały. Każdy z elementów receptorów poziomu L_1 jest powiązany z 15-20 ortoneuronami poziomu L_2 .

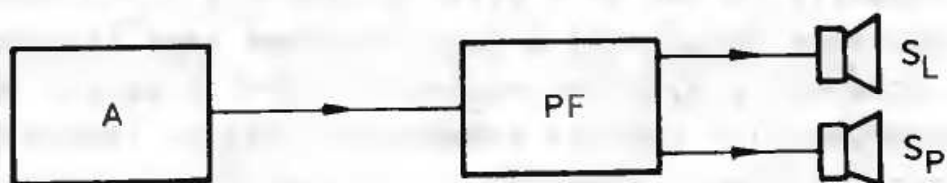
Na poziomie L_2 dokonuje się przekształcenie wielkości analogowej na impuls. Neurony tego poziomu charakteryzują się różnymi progami pobudzenia i w modelu są ułożone w kolejności wzrostu progów tworząc „linię” w dwuwymiarowej warstwie (x, y_2) , gdzie y_2 jest kierunkiem zmiany progów pobudzenia neuronów. Każdy element poziomu L_2 odpowiada na sygnał tylko jednym impulsem. Ponieważ neurony mają różne progi pobudzenia, to ich reakcja na sygnał polega na rozchodzeniu się wzbudzenia wzdłuż „linii” z prędkością, która zależy od kształtu czoła sygnału. Mamy tu do czynienia z transformacją „natężenie-miejsce”.

Elementami poziomu L_3 są detektory amplitudy sygnału dźwiękowego. Od elementów poziomu L_2 , o różnych progach pobudzenia, włókna dochodzą do rozszerzeń dendrytów elementu L_3 . Żeby mógł on zadziałać trzeba, aby do somy doszły jednocześnie impulsy z dendrytu i synapsy Helda. Każde odgałęzienie elementu L_3 jest sterowaną linią opóźniającą. Prędkość rozchodzenia się po niej impulsu zależy od ilości lokalnych rozszerzeń dendrytu i czasowej organizacji synaptycznych impulsów dochodzących do tych rozszerzeń. Funkcja neuronów poziomu L_3 polega na określeniu współrzędnej y_2 punktu, w którym prędkość rozchodzenia się wzbudzenia na poziomie L_2 osiąga maksimum. Wartość y_2 określa jednocześnie amplitudę punktu największego nachylenia na czole sygnału dźwiękowego. To, że neuron poziomu L_3 ma kilka odgałęzień, umożliwia mu odpowiedź na tę samą amplitudę przy różnych nachyleniach czoła impulsu.

Neurony poziomu L_4 , zwane w modelu detektorami pierwotnymi, pełnią dwie funkcje: na ich dendrytach odbywa się przekodowywanie amplitudy sygnału w opóźnienie i jako rezultat tego, formowanie „wypadkowego momentu” przyjścia impulsu do somy. Somę zaś uważa się za element koincydencji, którego prawdopodobieństwo zadziałania zależy od mierzonego kierunku. Elementy L_3 i L_4 są tak powiązane ze sobą, że im większa jest współrzędna y_3 elementu L_3 tym bliżej somy neuronu L_4 przychodzi na jego dendryt impuls z poziomu L_3 . Soma każdego neuronu L_4 jest elementem posiadającym dwa wejścia, na które przychodzą impulsy z lewego i prawego kanału obróbki jednousznej. Zakłada się, że pierwszy przychodzi impuls wzdłuż dendrytu bardziej oddalonego od aksonu. Impuls do drugiego wejścia przychodzi w fazie hiperpolaryzacji wytworzonej przez pierwszy impuls. Im większa jest przerwa między tymi impulsami, tym mniejsze jest prawdopodobieństwo zadziałania neuronu. W modelu przyjęto, że element L_4 odpowiada

z prawdopodobieństwem równym jedności, jeśli różnica wypadkowych momentów przyjścia do niego sygnałów z prawej i z lewej strony jest mniejsza od zera. Informacja o lokalizacji źródła dźwięku jest związana z położeniem na osi y_4 obszaru zmian od jedności do zera prawdopodobieństwa odpowiedzi elementów L_4 . Elementy L_4 nie mogą zmierzyć z wystarczającą dokładnością różnicy wypadkowych momentów przyjścia sygnałów z lewego i prawego kanału. Dlatego też piąty poziom L_5 ma za zadanie opracować reakcje elementów L_4 w celu zwiększenia dokładności wyników pomiaru. W procesie obróbki informacji na poziomie L_5 dokonuje się zwiększenie stromości krzywej prawdopodobieństwa odpowiedzi elementów na sygnał i wyznaczenie współrzędnej punktu y^* na osi y_4 , w którym to punkcie stromość krzywej jest maksymalna. W wyniku tych operacji na wyjściu L_5 tworzy się obszar wzbudzenia, którego położenie na osi y_5 określa kierunek źródła dźwięku, a jego rozmiary-dokładność określenia kierunku.

W celu eksperymentalnego sprawdzenia wpływu przesunięcia fazy tonów na lokalizację źródła dźwięku stosuje się aparaturę, której schemat ideowy przedstawiono na rys. 2. Generatorem tonu o ściśle określonej częstotliwości może być audiometr, do którego podłącza się przesuwnik fazowy, pozwalający zmieniać fazę tonu w jednym uchu względem drugiego. Z przesuwnika fazowego dwa rozdzielone tony o dokładnie tych samych częstotliwościach i amplitudach podaje się przez słuchawki do uszu badanego, który ma określić, czy słyszy różnicę między tymi dwoma tonami (różniącymi się tylko fazą) i jeśli tak, to jaką.

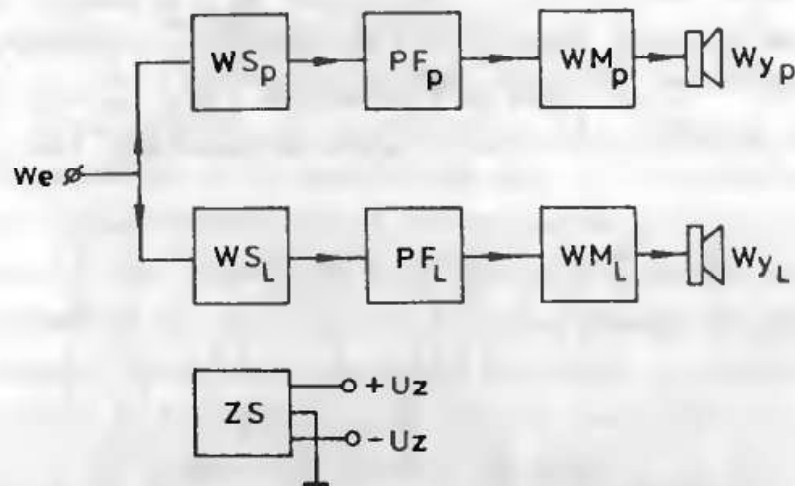


Rys. 2. Schemat ideowy aparatury do badania efektów percepcyjnych przesunięcia fazy tonów dochodzących do lewego i prawego ucha

W tym celu zbudowano dwa prototypowe układy w formie przystawek do audiometru. Pierwszy układ PF-01 pozwala na przesunięcie fazy ciągłych tonów koherentnych dochodzących do lewego i prawego ucha. W każdym kanale można regulować oddzielnie przesunięcie fazy w przedziale $0-360^\circ$, w przedziale częstotliwości 100 Hz-10 kHz [1]. Druga przystawka PF-02 do audiometru wytwarza paczki impulsów o regulowa-

nej szerokości w przedziale 50-500 ms, z regulowanym czasem repetycji również w zakresie 50-500 ms. Przystawka pozwala na uzyskanie przesunięcia fazy w jednym kanale w przedziale 0-180°.

Przesuwnik fazy PF-01 służy do zamiany koherentnych drgań akustycznych na dwa sygnały o takich samych częstotliwościach i amplitudach, a różniących się jedynie przesunięciem fazy względem drgań wejściowych. Jest on przeznaczony do współpracy z dowolnym audiometrem lub generatorem napięcia sinusoidalnego z zakresu częstotliwości akustycznych. Schemat blokowy przyrządu przedstawiono na rys. 3. Sygnał wyjściowy z audiometru podawany jest równolegle do wejść dwóch symetrycznych torów akustycznych. W każdym z torów stopniem wejściowym jest wzmacniacz separujący - WS, który dzięki dużej impedancji wejściowej nie obciąża wyjścia źródła sygnału sterującego.



Rys. 3. Schemat blokowy przesuwника fazy PF-01

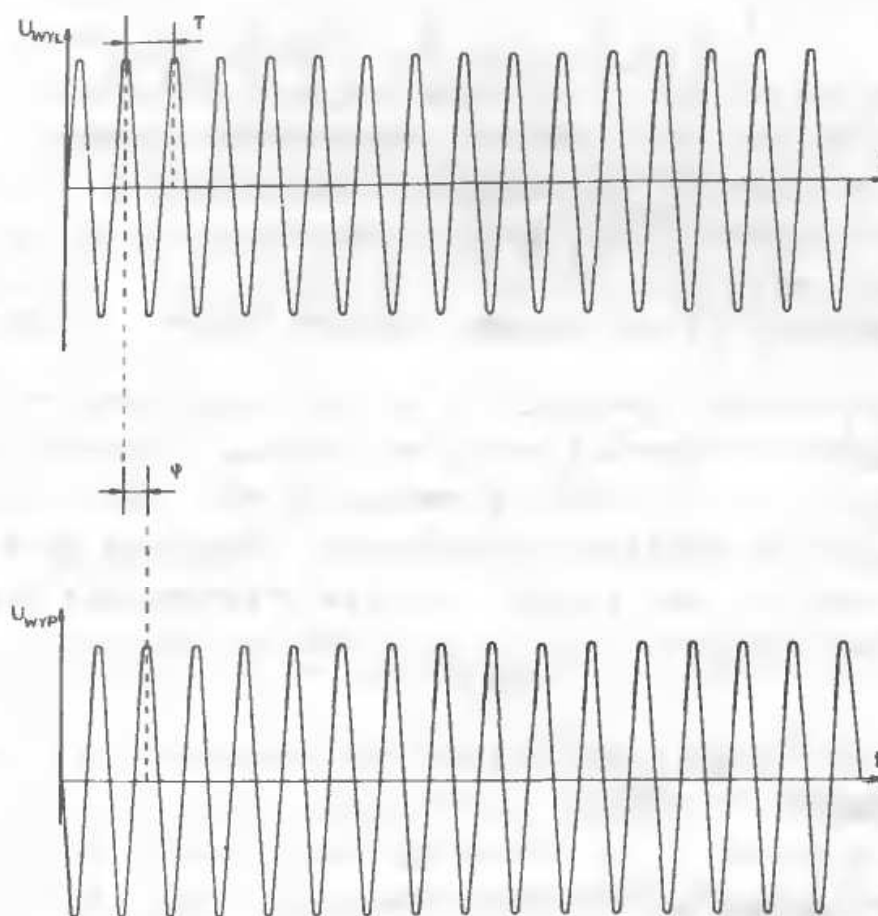
Wzmacniacze separujące cechują się bardzo małą impedancją wyjściową, co stwarza korzystne warunki pracy następnemu stopniowi, którym jest przesuwnik fazy - PF. Zadaniem przesuwnika jest opóźnienie w fazie sygnału wyjściowego względem wejściowego. Zbudowano go w oparciu o scalony wzmacniacz operacyjny. Funkcja przenoszenia tego układu jest określona relacją:

$$U(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_{we}(s)} = \frac{1 - sCR}{1 + sCR},$$

s - operator Laplace'a,

C, R - pojemność i rezystancja układu wprowadzającego przesunięcie fazy.

Przeprowadzając analizę powyższej zależności otrzymuje się, że jeżeli przy stałej wartości amplitudy napięcia wejściowego U_{we} będziemy zmieniać częstotliwość tego napięcia, to na wyjściu uzyskamy napięcie U_{wy} również o stałej amplitudzie, a zmianie ulegać będzie jedynie przesunięcie fazy U_{wy} w stosunku do U_{we} . Dużą zaletą układu jest to, że funkcja przenoszenia jest niezależna od właściwości wzmacniacza operacyjnego, jak również od rezystorów polaryzujących, napięć zasilających itp. Regulując wartość rezystora R od zera do nieskończoności, przy ustalonej częstotliwości napięcia wejściowego, otrzymuje się zmianę przesunięcia fazy od $0-180^\circ$, przy czym amplituda pozostaje stała. W wykonanym przesuwniku tak dobrano elementy R i C , że przy zmianach częstotliwości napięcia wejściowego od 100-2000 Hz możliwe jest uzyskanie przesunięcia fazowego od $0-180^\circ$, przy stałej amplitudzie napięcia wyjściowego. Dzięki zastosowaniu w każdym z torów dwóch takich układów, rozszerzono zakres zmian fazy do 360° . Z wyjścia przesuwnika fazy sygnał podawany jest na wejście wzmacniacza mocy - WM. Wzmacniacz ten charaktery-



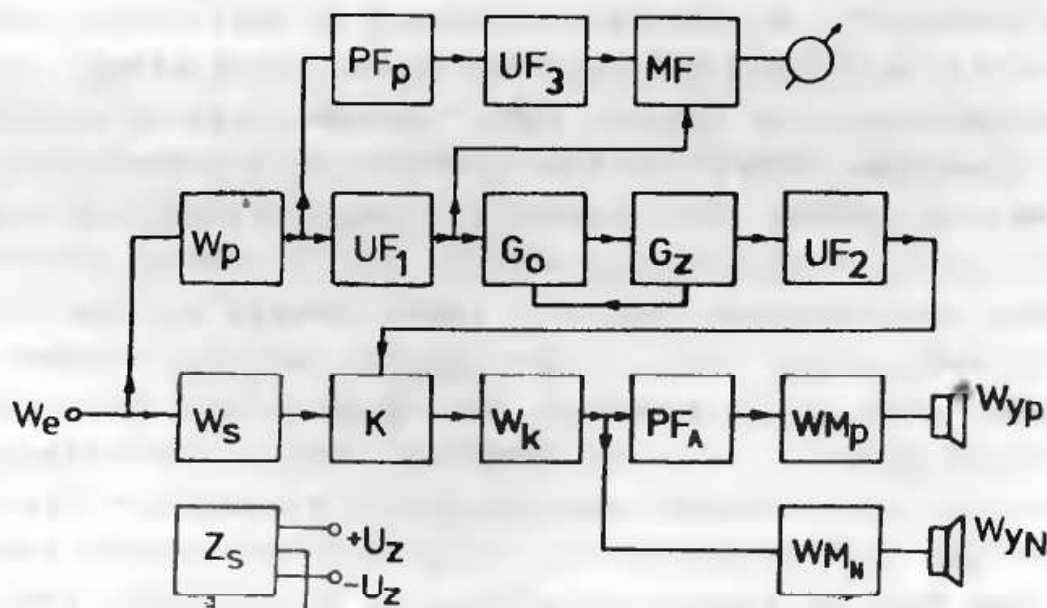
Rys. 4. Przebiegi napięć wyjściowych otrzymanych w układzie przesuw-
nika fazowego PF-01

zuja się dużym wzmocnieniem prądowym oraz bardzo małą impedancją wyjściową. Umożliwia to obciążenie przesuwnika głośnikami lub słuchawkami o małej impedancji. Przebiegi napięć wyjściowych przedstawiono na rys. 4. Parametry elektryczne przesuwnika fazy:

- zakres zmian przesunięcia fazy $0-360^\circ$,
- zakres zmian częstotliwości $100-2000$ Hz,
- zmiany amplitudy napięcia wyjściowego przy regulacji fazy $< 0,1$ dB,
- zniekształcenie nieliniowe $< 0,5\%$,
- wzmocnienie napięciowe każdego z torów akustycznych $k_u = 1$,
- rezystancja obciążenia $\geq 3\Omega$.

Układy elektroniczne przesuwnika zasilane są z wewnętrznego stabilizowanego zasilacza prądu stałego.

Przesuwnik fazy PF-02, podobnie jak PF-01, służy do zamiany koherentnych drgań akustycznych na dwa sygnały o jednakowych częstotliwościach i amplitudach, a różniących się jedynie przesunięciem fazy. Zasadnicza różnica w działaniu obu przyrządów polega na tym, że w przypadku przesuwnika PF-01 na wyjściu otrzymujemy ciągłe drgania sinusoidalne, natomiast na wyjściu przesuwnika PF-02 otrzymuje się paczki sygnałów o regulowanym czasie trwania i regulowanym czasie przerwy między paczkami. Schemat blokowy przyrządu przedstawiono na rys. 5. Sygnał wejściowy z audiometru lub generatora podawany jest

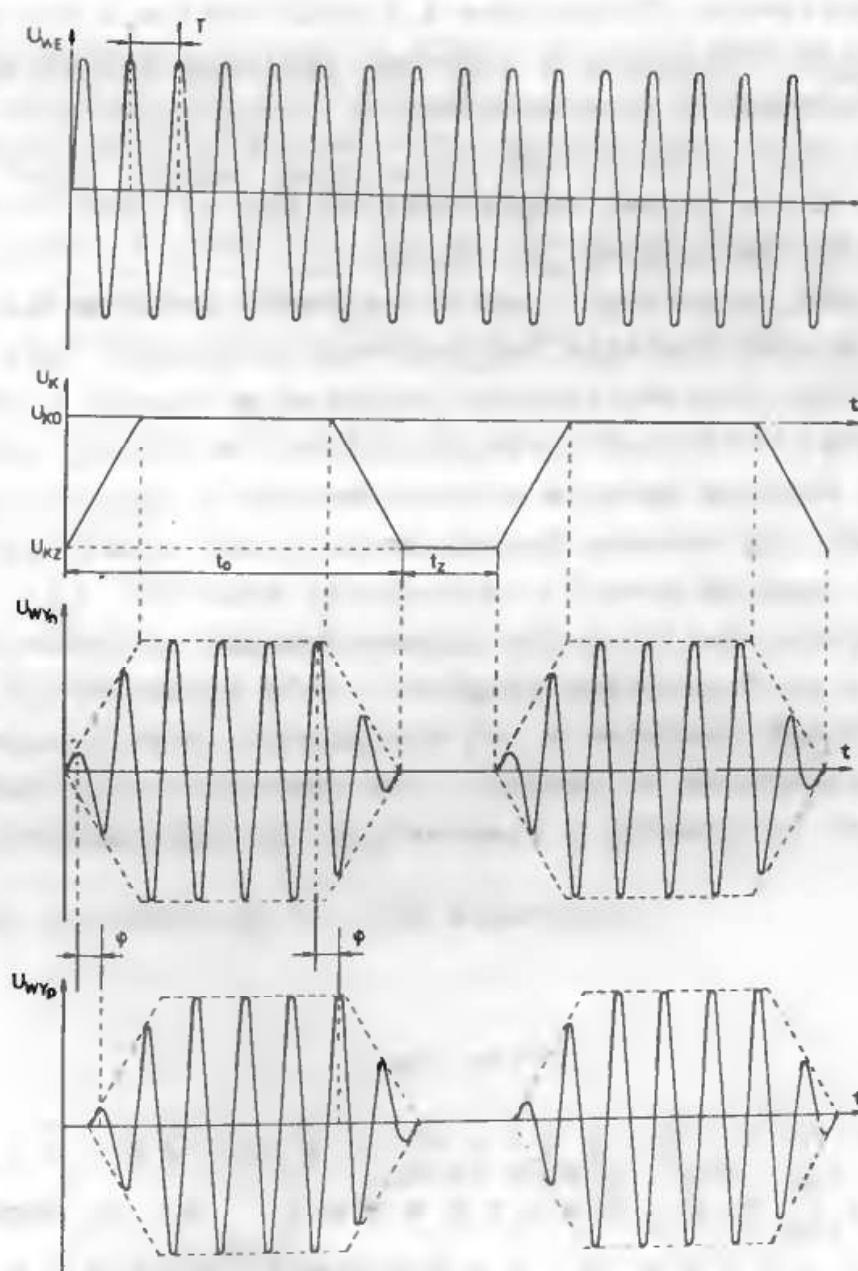


Rys. 5. Schemat blokowy przesuwnika fazy PF-02

równolegle do kluczującego wzmacniacza akustycznego i układu synchronizacji. Pierwszym blokiem w torze wzmacniania akustycznego jest

wzmacniacz separujący - WS, którego zadaniem jest zapewnienie dużej impedancji wejściowej oraz małej impedancji wyjściowej. Sygnał wyjściowy ze wzmacniacza separującego, przez klucz tranzystorowy, podawany jest na wejście wzmacniacza korekcyjnego WK o regulowanym wzmacnieniu napięciowym. Zadaniem tego wzmacniacza jest taka korekta wzmocnienia, aby wzmocnienie napięciowe całego tonu akustycznego wynosiło jeden, co umożliwi odczyt poziomu sygnału wyjściowego bezpośrednio na skali audiometru. Z wyjścia wzmacniacza korekcyjnego sygnał podawany jest równolegle na wejście przesuwника fazy PF_A oraz wzmacniacza mocy WM_N sygnału o stałym przesunięciu fazy. Zasada działania przesuwника została omówiona szerzej przy opisie przesuwника PF-01. Opóźniony w fazie sygnał z wyjścia przesuwника podawany jest na wejście wzmacniacza mocy WM_P sygnału o regulowanym przesunięciu fazy. Zadaniem wzmacniaczy mocy WM_N i WM_P jest zapewnienie małej impedancji wyjściowej oraz dużego wzmocnienia prądowego. Umożliwia to obciążenie wyjść przetwornikami elektroakustycznymi o małej impedancji. W układzie synchronizacji sygnał ulega wzmocnieniu we wzmacniaczu pomiarowym W_P zbudowanym na wzmacniaczu operacyjnym, a następnie przekształceniu w impulsy prostokątne w układzie formującym UF_1 , zbudowanym w układzie komparatora. Impulsy te wyzwalają generator impulsu sterującego kluczem, składający się z generatora otwierającego G_0 i generatora blokującego G_Z . Wyzwolenie generatora otwierającego G_0 odbywa się z dodatnim zboczem impulsu uzyskanego z wyjścia układu UF_1 . W układzie generatora G_0 zastosowano potencjometr umożliwiający regulację czasu trwania wytwarzanego impulsu. Z chwilą zakończenia się impulsu otwierającego, zostaje uruchomiony generator blokujący, który zwrotnie oddziałuje na generator G_0 , uniemożliwiając ponowne jego wyzwolenie przed zakończeniem się impulsu blokującego. W układzie generatora G_Z zastosowano również potencjometr umożliwiający regulację czasu trwania impulsu blokującego. Po zakończeniu się impulsu blokującego pierwszy dodatni półokres sygnału wejściowego powoduje ponowne wyzwolenie generatora impulsu otwierającego i cykl się powtarza. Impuls otwierający przez układ formujący UF_2 , podawany jest na bramkę tranzystora kluczującego, powodując jego cykliczne włączanie. Zadaniem układu formującego UF_2 jest zamiana impulsu prostokątnego w trapezowy. Taki kształt impulsu sterującego powoduje łagodne włączanie i wyłączanie klucza, a tym samym eliminuje trzask pojawiający się w słuchawkach na początku i końcu paczki sygnałowej w przypadku sterowania klucza

impulsem o dużej stromości zboczy, narastającego i opadającego. Pomiar kąta przesunięcia fazowego odbywa się za pomocą wskazówkowego miernika fazy MF . Zasada pracy miernika jest następująca: sygnał wejściowy, po wzmacnieniu we wzmacniaczu pomiarowym W_P , podawany jest na wejście przesuwника fazy PF_P , sprzężonego z przesuwnikiem fazy toru akustycznego PF_A . Z wyjścia przesuwника toru pomiarowego PF_P sygnał podawany jest na układ formujący UF_3 , pracujący w układzie komparatora. Na wyjściu układu UF_3 otrzymujemy prostokątne impulsy o regulowanym przesunięciu fazy względem sygnału wejściowego. Miernik fazy MF pracuje w układzie wzmacniacza róż-



Rys. 6. Podstawowe przebiegi sygnałowe otrzymywane w układzie przesuwника fazowego PF-02

nicowego. Do jednego z wejść wzmacniacza podawane są impulsy z wyjść układów UF_1 i UF_3 w układzie logicznego iloczynu. Do drugiego wejścia podawane są impulsy z wyjścia UF_1 . Takie rozwiązanie układowe zapewniło liniową zależność średniej wartości prądu wyjściowego wzmacniacza od wielkości przesunięcia fazowego. Odczyt wartości kąta przesunięcia fazowego odbywa się na skali miernika wskazówkowego, włączonego na wyjście wzmacniacza różnicowego. Podstawowe przebiegi sygnałowe w układzie przedstawiono na rys. 6. Przyrząd zasilany jest napięciem przemiennym 220 V, 50 Hz. Napięcie to jest obniżane w transformatorze sieciowym, a następnie dwupołkowo prostowane, filtrowane i stabilizowane w wewnętrznych stabilizatorach dodatniego i ujemnego napięcia zasilającego.

Parametry elektryczne przesuwника:

- zakres zmian fazy $0-180^\circ$,
- czas trwania paczki sygnałowej 50-500 ms,
- czas trwania przerwy 50-500 ms,
- pozostałe parametry - jak w przypadku przesuwника PF-01.

Badania eksperymentalne nad wpływem przesunięć fazy tonów na lokalizację źródła dźwięku zostały podjęte (w oparciu o zbudowane przesuwniki fazowe) w Klinice Laryngologicznej Wojskowej Akademii Medycznej w Łodzi. Wstępne badania przeprowadzone z zastosowaniem układu PF-01 wykazały, że wszyscy badani stwierdzili lokalizację dźwięku przy zmianie fazy od $30-90^\circ$ (najczęściej przy 45°) [3].

Pomiary przeprowadzono dla częstotliwości od 125-1000 Hz. Otrzymane wyniki z zastosowaniem ciągłych tonów koherentnych zachęcają do podjęcia dalszych wysiłków w tej dziedzinie, w celu lepszego poznania procesu słyszenia obuusznego, jak również w celu opracowania metody badawczej przydatnej w diagnostyce laryngologicznej.

Maszynopis wpłynął do Redakcji 23 VIII 1980

LITERATURA

- [1] Banach A., Bryszewska M., Jatczak J., Mat. V. Symp. Fiz. Med., Gdansk 1978.
- [2] Garner W. R., Wertheimer M., J. Acoust. Soc. Am., 23, 664 (1951).
- [3] Gryczyńska D., Jatczak J., Latkowski B. Otolaryngologia polska, w druku.
- [4] Lubinski I. A., Pozin N. W., Szmel'ew L. A. Biofizika, 18, 105 (1973).

- [5] L i u b i n s k i j I. A., P o z i n N. W., S z m e l e w L. A.,
Biofizika, 22, 345 (1977).
[6] L i u b i n s k i j I. A., P o z i n N. W., S z m e l e w L. A.,
Biofizike, 22, 895 (1977).

Arkadiusz Banach, Maria Bryszewska, Jerzy Jatczak

LOCALIZATION OF THE HEARING DIRECTION
AND PHASE DIFFERENCE OF COHERENT TONES

S u m m a r y

The localization of a sound source by an organism follows by analysing of information included in a difference of phases and amplitudes of acoustic signals received by the left and right ears. In our article the biophysical model of neuron structures of the part of the aural system responsible for the localization of a sound source is described.

For experimental verification of the phase difference influence on the sound source localization two phase shifting circuits PF-01 and PF-02 were built and applied with an audiometer. The detailed description of their construction and work is given. Introductory investigations by use of PF-01 showed, that in the frequency range 125-1000 Hz all the persons under examination found the localization of a sound source when the phase difference changed from 30 to 90°.

inż. ARKADIUSZ BANACH
mgr MARIA BRYSZEWSKA
doc. dr JERZY JATCZAK
Zakład Biofizyki
Instytut Fizjologii i Biochemii
Akademii Medycznej
ul. Lindleya 3
90-131 Łódź