

Artur Lorens<sup>1</sup>, Adam Walkowiak<sup>1</sup>, Anna Piotrowska<sup>2</sup>, Lech Śliwa<sup>1</sup>,  
Andrzej Czyżewski<sup>3</sup>, Henryk Skarżyński<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Zakład Naukowo-Wdrożeniowy Techniki Medycznej i Akustyki, IFPS, Warszawa

<sup>2</sup> Klinika Chorób Uszu, Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, Warszawa

<sup>3</sup> Katedra Inżynierii Dźwięku i Obrazu, Politechnika Gdańska

## Pomiary psychofizyczne „słuchu elektrycznego”

### Psychophysical Examination of „Electric Hearing”

**Słowa kluczowe:** implanty słuchowe, elektrostymulacja, filtry słuchowe, rozdzielczość częstotliwościowa.

**Key words:** auditory implants, electrostimulation, auditory filters, frequency selectivity.

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono sposób wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych filtrów słuchowych „słuchu elektrycznego” u pacjentów z implantami ślimakowymi. Znajomość tych charakterystyk pozwala określić selektywność częstotliwościową wrażeń słuchowych uzyskiwaną przy stymulacji nerwu słuchowego impulsami elektrycznymi. W opisanej metodzie pomiaru wykorzystano masker w postaci szumu pasmowego. Wyznaczono charakterystyki filtrów słuchowych dla grupy pacjentów korzystających z wielokanałowych implantów ślimakowych z impulsową strategią kodowania typu CIS. Przebieg charakterystyk porównano z uzyskanymi podobną metodą charakterystykami dla osób o słuchu normalnym. Sformułowano wnioski o przydatności wyników dla procedur dopasowania procesorów implantów słuchowych.

#### Summary

In the paper, the Authors present a method of determining frequency characteristics of the auditory filters that characterise the hearing of patients provided with cochlear implants. The knowledge of these characteristics makes it possible to determine frequency selectivity of hearing in the case of stimulation of auditory nerve by electric pulses. In the described method, the Authors used band-limited noise as a masker. Auditory filter characteristics were determined for a group of patients using multichannel cochlear implants with the CIS coding strategy. The characteristics were compared with

those obtained by similar method for acoustic hearing of healthy subjects. Conclusions were formulated on the usability of the results for the procedure of speech processor fitting.

## I. WPROWADZENIE

Rozwój, który dokonał się w ostatnich latach w zakresie zarówno medycyny, jak i inżynierii i technologii biomedycznej, spowodował wprowadzenie do praktyki klinicznej elektronicznej protezy słuchu będącej elektrostymulatorem nerwu słuchowego i nazwanej systemem implantu ślimakowego. Wrażenia słuchowe wywoływane za pośrednictwem systemu implantu ślimakowego określane są jako słuch elektryczny. Pod wieloma względami różni się on od słuchu fizjologicznego. Autorzy przedstawiają w tej pracy wyniki badań psychofizycznych, wykonanych na wybranej grupie pacjentów implantowanych, których celem było określenie niektórych właściwości słuchu elektrycznego, takich jak np. rozdzielczość częstotliwościowa. Poniżej sprecyzowano niektóre ważniejsze pojęcia dotyczące przedmiotu niniejszej pracy.

### 1. System implantu ślimakowego

System implantu ślimakowego stosowany jest w przypadku braku korzyści osiąganych przez pacjenta w aparatach słuchowych. Zasada działania systemu implantu ślimakowego polega na bezpośredniej elektrycznej stymulacji zakończeń nerwu słuchowego [Waltzman, Cohen 2000]. W ten sposób możliwe jest ominięcie uszkodzonego ucha wewnętrznego, a dla potrzeb odbioru dźwięku z otoczenia wykorzystany jest pozostały sprawny odcinek drogi słuchowej. Aby zasadę tę zrealizować, konieczne jest przetwarzanie sygnału akustycznego do postaci umożliwiającej stymulację nerwu ślimakowego oraz doprowadzenie bodźca elektrycznego do zakończeń nerwowych. Przetwarzanie sygnału akustycznego na bodziec elektryczny wykonywane jest przez część zewnętrzną systemu zwaną procesorem mowy natomiast doprowadzenie bodźca do zakończeń nerwowych przez część wewnętrzną zwaną implantem ślimakowym [Hochmair-Desoyer, Hochmair 1996]. Zdolność słyszenia powstała w wyniku stosowania systemu implantu ślimakowego określana jest jako „słuch elektryczny”.

### 2. Badania psychofizyczne

Badania psychofizyczne dotyczą percepcji bodźca fizycznego przez zmysły człowieka. Określają one związek między bodźcem a wywołanym przez niego wrażeniem. Badania psychofizyczne mogą być stosowane w przypadku „słuchu elektrycznego”, czyli słuchu powstałego w wyniku stymulacji elektrycznej nerwu

słuchowego realizowanej przez system implantu ślimakowego. W tym przypadku bodźcem fizycznym jest prąd elektryczny stymulujący zakończenia nerwu słuchowego, a wywołanym przez niego wrażeniem – wrażenie słuchowe. Dzięki zastosowaniu badań psychoakustycznych [Gelfand 1998] możliwe jest określenie pewnych podstawowych właściwości psychofizycznych słuchu, takich jak: percepcja głośności, rozdzielczość częstotliwościowa oraz rozdzielczość czasowa.

### 3. Właściwości psychofizyczne słuchu elektrycznego

Przy zastosowaniu systemu implantu ślimakowego możliwe jest przywrócenie, w pewnym stopniu, zdolności słyszenia. Jednak właściwości psychofizyczne „słuchu elektrycznego”, takie jak percepcja głośności, rozdzielczość częstotliwościowa oraz czasowa, różnią się od właściwości słuchu fizjologicznie prawidłowego [Lorens (i in.) 1999a, b]. Właściwości te zależą zarówno od metody przetworzenia sygnału elektrycznego na bodziec elektryczny, zwanej strategią kodowania [Hochmair-Desoyer, Hochmair 1996], jak również od właściwości biofizycznych złącza elektrody – zakończenia nerwu słuchowego. Właściwości biofizyczne takiego złącza są dla każdego pacjenta inne. Związane jest to między innymi z różnymi położeniami elektrody w ślimaku, różnicami w elektrycznych charakterystykach tkanek, w rozplywie prądu stymulującego oraz w liczebności przetrwałych zakończeń neuronalnych.

Różnice pomiędzy właściwościami psychofizycznymi słuchu elektrycznego i słuchu fizjologicznie prawidłowego są prawdopodobnie jedną z głównych przyczyn występowania trudności w rozumieniu mowy u pacjentów implantowanych. Z przeprowadzonych dotychczas badań różnych autorów wynika, że rozdzielczość częstotliwościowa odgrywa ważną rolę w rozumieniu mowy. Rozdzielczość częstotliwościowa określa bowiem zdolność do percepcji pojedynczego dźwięku na tle innych dźwięków w złożonym sygnale, jakim jest mowa. Z tego powodu uznano wyznaczenie rozdzielczości częstotliwościowej w wybranej grupie pacjentów implantowanych za zadanie o pierwszoplanowym znaczeniu.

## II. MATERIAŁ

Materiał stanowiło 4 pacjentów użytkowników wielokanałowych systemów implantów ślimakowych Combi 40+, których dane zebrane są w tabeli 1. Wszyscy pacjenci utracili słuch po wykształceniu mowy i używali systemu implantu przez więcej niż 4 lata.

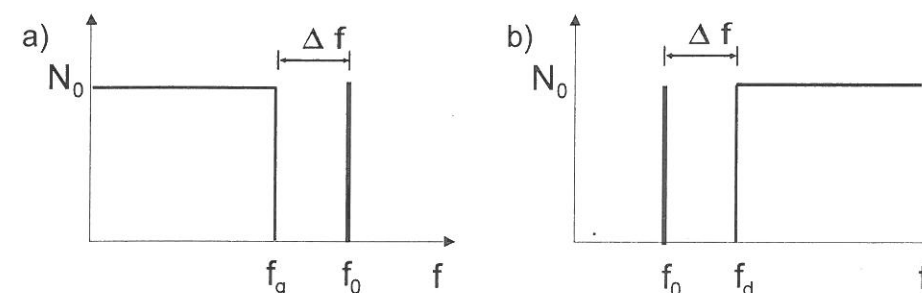
Tab. 1. Zestawienie podstawowych danych pacjentów poddanych badaniom

| Pacjent | Wiek pacjenta (lata) | Wiek, w którym stwierdzono głęboki niedosłuch albo głuchotę (lata) | Przyczyna utraty słuchu        | Wiek implantowania (lata) | Typ procesora mowy |
|---------|----------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------|
| E. Z.   | 23                   | 4                                                                  | leki ototoksyczne              | 20                        | Combi 40           |
| G. G.   | 32                   | 23                                                                 | nieznana, głuchota postępująca | 28                        | Combi 40           |
| A. O.   | 26                   | 11                                                                 | świnka                         | 21                        | Combi 40           |
| B. R.   | 30                   | 11                                                                 | zapalenie opon                 | 25                        | Combi 40           |

### III. METODA

W celu określenia rozdzielczości częstotliwościowej pacjentów implantowanych wykorzystano metodę opracowaną do wyznaczania rozdzielczości częstotliwościowej słuchu fizjologicznie prawidłowego [Gelfand 1998]. Metoda ta oparta jest na modelu, w którym układ słuchowy traktowany jest jako zespół filtrów pasmowo-przepustowych, zwanych filtrami słuchowymi, o charakterystykach częstotliwościowych wzajemnie nakładających się [Agerkwist 1996; Gelfand 1998]. Kształt charakterystyki filtrów słuchowych, a zwłaszcza szerokość ich pasma, może być uznana jako miara rozdzielczości częstotliwościowej. Kształt charakterystyki filtru wyznacza się wykorzystując tzw. zjawisko maskowania. Proóg słyszenia dla sygnałów tonalnych o częstotliwościach 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz i 4000 Hz był mierzony w obecności tzw. maskera będącego szumem o ograniczonym widmie, odpowiednio dolno- lub górnopasmowym. Pomiary wykonywano w następujący sposób. Dla sygnałów o częstotliwościach 1000 Hz i 500 Hz wyznaczano próg detekcji sygnału zmieniając dolną częstotliwość graniczną szumu górnopasmowego od wartości wyraźnie większych od częstotliwości sygnału do wartości równej częstotliwości sygnału. Dla sygnałów o częstotliwościach 2000 Hz i 4000 Hz postępowano odwrotnie, górną częstotliwość graniczną szumu dolnopasmowego zmieniano od wartości wyraźnie mniejszych od częstotliwości sygnału do wartości równych częstotliwości sygnału. Następnie, korzystając z odpowiedniego modelu matematycznego, wyznaczano kształt charakterystyki hipotetycznych filtrów słuchowych.

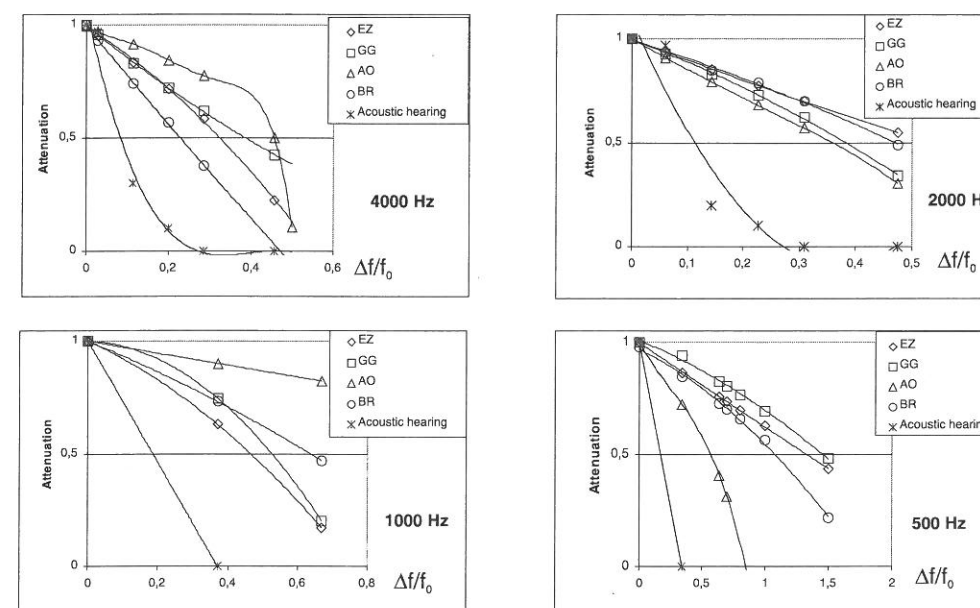
Postać charakterystyk częstotliwościowych sygnałów naszkicowano na ryc. 1.



Ryc. 1. Szkic charakterystyk widmowych sygnału tonalnego i szumu pasmowego przy wyznaczaniu charakterystyk filtru słuchowego a)  $f_0 = 2$  kHz lub 4 kHz, b)  $f_0 = 500$  Hz lub 1 kHz

### IV. WYNIKI

Uzyskane opisaną metodą charakterystyki hipotetycznych filtrów słuchowych obrazują rozdzielczość częstotliwościową „słuchu elektrycznego” pacjentów implantowanych. Zespół przykładowych charakterystyk pokazano na ryc. 2.



Ryc. 2. Charakterystyki filtrów słuchowych pacjentów implantowanych

## V. WNIOSKI

Uzyskane rezultaty świadczą o możliwości określonej rozdzielczości częstotliwościowej poprzez zastosowanie wielokanałowego systemu implantu ślimakowego. Uzyskana rozdzielczość odbiega jednak od tej, jaka charakteryzuje naturalny „słuch akustyczny”. Wyznaczone kształty hipotetycznych filtrów dla użytkowników systemów wielokanałowych Combi 40 + różnią się od kształtów filtrów słuchowych w przypadku słuchu prawidłowego. Są one mniej strome i świadczą o pogorszonej rozdzielczości częstotliwościowej pacjentów implantowanych. Pogorszenie to może być wynikiem charakterystyki biofizycznej złącza elektroda – neurony, a zwłaszcza złej separacji elektrycznej poszczególnych elektrod w ślimaku.

Znajomość kształtów hipotetycznych filtrów pacjentów implantowanych może zostać wykorzystana w przyszłości do stworzenia psychofizycznego kompleksowego modelu słuchu elektrycznego, analogicznego do modeli psychoakustycznych słuchu prawidłowego. Taki model może pomóc w optymalizacji strategii kodowania w systemach implantów ślimakowych

## Bibliografia

- Agerkvist F. T. (1996). A time-frequency auditory model using wavelet packets. „J. Audio. Eng. Soc.” 44, 1/2.
- Gelfand S. A. (1998). Hearing – an introduction to psychological and physiological acoustics. New York: Marcel Dekker, INC.
- Glasberg B. J., More B. C. J. (1990). Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data. „Hear. Res” 47, 103-138.
- Hochmair-Desoyer I. J., Hochmair E. (1996). Implementation of coding strategies in cochlear implant systems and comparative results. „Central and East European Journal of Oto-Rhino-Laryngology and Head and Neck Surgery” 1, 33-41.
- Lorens A., Walkowiak A., Czyżewski A., Skarżyński H (1999a). Frequency selectivity in electric stimulation of auditory nerve. XX Warsztaty Naukowo-Szkoleniowe Audiologii. 6th International Conference on Physiology and Pathology of Hearing under the auspices of the European Academy of Otology and Neuro-Otology (EAONO), Mikołajki, 14-16 September 1999.
- Lorens A., Skarżyński H., Czyżewski A. (1999b). Frequency selectivity of the auditory nerve determined by the electric stimulation. 106th Convention 1999 May 8-11, Munich, Germany, An Audio Engineering Society, Preprint No 4875.
- Waltzman S. B., Cohen N. L. (2000). Cochlear implants, New York: Thieme.