

Przegląd metod badań słuchu w kontekście analizy profilu słuchowego

Review Of Hearing Test Methods in The Context of Auditory Profile Analysis

Andrzej Wicher

Instytut Akustyki, Wydział Fizyki
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

STRESZCZENIE

Głównym celem pracy było dokonanie przeglądu metod badania słuchu które mogą stanowić podstawę do opracowania tzw. „profilu słuchowego” badanej osoby, będącego przydatną bazą procedur zarówno na etapie diagnostycznym, protetycznym, jak i w zakresie rehabilitacji słuchu. Wskazano na nowoczesne metody badania selektywności częstotliwościowej, spostrzegania zmian subtelnej struktury sygnału, oceny szumów usznych, diagnostyki martwych obszarów ślimaka ucha wewnętrznego i analizy zdolności poznawczych. W artykule położono szczególny nacisk na dużą przydatność testów zrozumiałości mowy na tle zakłóceń.

Słowa kluczowe: profil słuchowy, zrozumiałość mowy w szumie, selektywność częstotliwościowa, subtelna struktura sygnału, martwe obszary ślimaka, zdolności poznawcze

SUMMARY

The main objective of this paper was to review hearing test methods that can form the basis for the development of so-called "auditory profile" which is a useful base of procedures both at the diagnostic and prosthetic stage, as well as in the field of hearing rehabilitation. Modern methods of testing frequency selectivity, perception of changes in the temporal fine structure, assessment of tinnitus, diagnostics of dead regions in the cochlea and analysis of cognitive abilities have been pointed out. The article places special emphasis on the high usefulness of speech intelligibility tests in noise.

Keywords: auditory profile, speech intelligibility in noise, frequency selectivity, temporal fine structure, cochlear dead regions, cognitive abilities

1. Wprowadzenie

Intensywny rozwój cyfrowych metod analizy sygnałów, miniaturyzacji analogowo-cyfrowych systemów przetwarzania sygnału powoduje, że w zakresie wspomaganego słyszenia powstają coraz bardziej zaawansowane technologicznie aparaty słuchowe, zarówno od strony mikroelektroniki, jak i również oprogramowania. Równolegle obserwuje się proces doskonalenia narzędzi do diagnostyki słuchu, ponadto w laboratoriach naukowo-badawczych powstają nowe metody diagnostyczne, które mają na celu uzyskanie pełniejszej i bardziej szczegółowej diagnozy co do uszkodzeń w systemie słuchowym człowieka na poszczególnych etapach przetwarzania dźwięku.

Ocena stanu słuchu danej osoby realizowana jest przede wszystkim poprzez metody subiektywne, tzn. audiometrię tonalną, poprzedzoną wywiadem i badaniami wstępnymi, tzn. badaniami stroikowymi i badaniem szeptem [1]. Zgodnie z wytycznymi Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) stopień uszkodzenia słuchu określany jest na podstawie średniej arytmetycznej progów słyszenia dla częstotliwości 0.5, 1, 2, 4 kHz [2]. Wyróżnione są cztery stopnie uszkodzenia słuchu: lekki (26-40 dB HL), umiarkowany (41-60 dB HL), znaczny (61-80 dB HL) oraz głęboki (> 80 dB HL). W odniesieniu do orzekania zawodowego uszkodzenia słuchu, wyznacza się

średni ubytek słuchu na podstawie progów słyszenia dla 1, 2 i 3 kHz, biorąc pod uwagę ucho lepiej słyszące [3]. W żadnym z ww. przypadków nie bierze się pod uwagę kształtu funkcji audiogramu, tzn. czy jest to funkcja stała, rosnąca, czy malejąca w dziedzinie częstotliwości. W ramach audiometrii tonalnej wyznaczany jest także próg dyskomfortu. Próg słyszenia i dyskomfortu w funkcji częstotliwości stanowi zakres słyszenia danej osoby. W wytycznych WHO dotyczących określania stopnia uszkodzenia słuchu podano informacje, że progi słyszenia nie powinny być jedynym wyznacznikiem dla ustawień aparatów słuchowych i wskaźnikiem niepełnosprawności słuchowej. Pojawia się tu pewna niekonsekwencja, gdyż z jednej strony progi słyszenia i dyskomfortu nadal stanowią podstawę diagnostyki słuchu i główne dane wejściowe do dopasowania aparatu słuchowego oraz orzekania zawodowego uszkodzenia słuchu, a z drugiej strony WHO zwraca uwagę, że progi słyszenia nie odzwierciedlają wydolności słuchu w przypadku procesu komunikowania się na tle zakłóceń. Istnieje zatem potrzeba wdrożenia takich metod badania słuchu które będą w stanie w szybki sposób wskazać ten element drogi słuchowej który jest główną przyczyną niedosłuchu, a przede wszystkim określić realną wydolność słuchu danej osoby w warunkach jak najbardziej zbliżonych do warunków rzeczywistych. Ponadto opracowane metody powinny być narzędziem do określania wstępnych ustawień param-

trów aparatów słuchowych, a także przynajmniej część z tych metod powinna służyć do walidacji dopasowanych aparatów słuchowych przy uzyskaniu konkretnych wskaźników ilościowych, będących podstawową miarą efektywności dopasowania aparatów słuchowych.

Dlatego też, głównym celem pracy było dokonanie przeglądu metod badania słuchu które mogą stanowić podstawę do opracowania tzw. „profilu słuchowego” badanej osoby, będącego przydatną bazą procedur zarówno na etapie diagnostycznym, protetycznym, jak i w zakresie rehabilitacji słuchu. W pracy przytoczono w głównej mierze propozycje najnowszych metod badania słuchu, których przynajmniej część jeszcze nie wdrożono do powszechnego stosowania. Należy zwrócić uwagę, że o stopniu przydatności danej metody w dużej mierze decyduje czas jaki jest potrzebny na wykonanie badań i uzyskanie wyniku. Im krótszy czas badania, przy zachowaniu wysokiego stopnia wiarygodności metody, tym bardziej realna możliwość wykorzystania danej metody w praktyce. W artykule położono szczególny nacisk na dużą przydatność testów zrozumiałości mowy na tle zakłóceń. Należy też podkreślić, że w pracy skupiono się jedynie na subiektywnych metodach badań słuchu, metody obiektywne stanowiąc będą przedmiot dyskusji w kolejnej publikacji.

Zagadnienia zawarte w tej pracy stanowią zasadniczą część jednego z projektów badawczych przygotowywanych przez autora tej publikacji. Założeniem autora tej publikacji jest także wywołanie dyskusji w środowisku protetyków słuchu i audiologów na temat aktualizacji metod diagnostyki i rehabilitacji słuchowej. Ponadto autor pracy otwarty jest na propozycje współpracy i tworzenia nowych projektów badawczych w zakresie w.w. tematyki.

2. Badania słuchu w aspekcie dostępnych aktualnie technologii

Jedną z najważniejszych funkcji naszego słuchu jest zdolność do komunikowania się poprzez percepcję i analizę dźwięków mowy. Ponadto działanie układu słuchowego umożliwia określenie położenia i identyfikację źródeł dźwięków w przestrzeni. Te dwie ww. funkcje słuchu są najistotniejsze do prawidłowego funkcjonowania w środowisku akustycznym. W niniejszej pracy główny nacisk został położony na zagadnienie zrozumiałości mowy, szczególnie zakłóconej różnego rodzaju dźwiękami maskującymi.

Na zrozumiałość mowy wpływa przede wszystkim wiele czynników związanych bezpośrednio z funkcjami układu słuchowego, ale również z funkcjami kognitywnymi. Najistotniejsze właściwości słuchu, ujęte w najbardziej ogólny sposób to selektywność częstotliwościowa [4-6] i rozdzielczość czasowa [7, 8]. Selektywność częstotliwościowa słuchu w najprostszym ujęciu polega na percepcyjnym rozseparowaniu dźwięku złożonego, np. wielotonu na poszczególne składowe tonalne. W nieco innym ujęciu możemy mówić o zdolności do detekcji/słyszenia jednego rodzaju dźwięku na tle innego dźwięku/dźwięków. Miarą selektywności częstotliwościowej jest maskowanie, czyli zmiana progu słyszenia dźwięku maskowanego w obecności sygnału maskującego – maskera. Z kolei rozdzielczość czasową słuchu określa najkrótsza przerwa czasowa

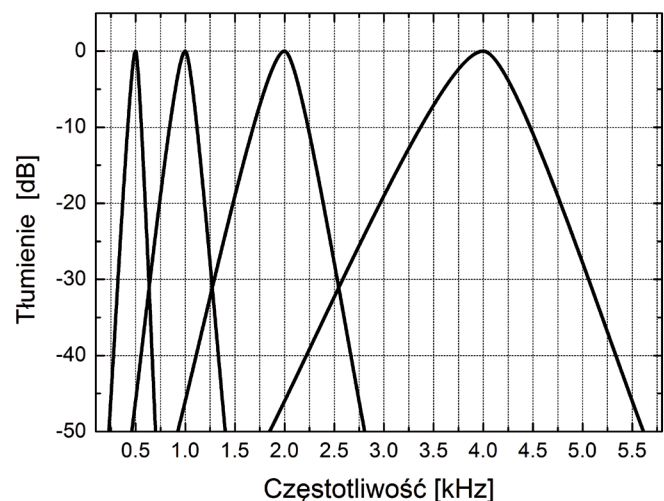
pojawiająca się w dźwięku którą możemy spostrzec. W przypadku zastosowania szumu szerokopasmowego próg spostrzegania przerwy czasowej wynosi 2-3 ms [9].

Jak łatwo zauważyć, zarówno ocena selektywności częstotliwościowej, jak i rozdzielczości czasowej nie jest brana pod uwagę podczas podstawowych pomiarów audiometrii tonalnej. Żadna z prób nadprogowych nie stanowi sensu stricto metody oceny selektywności częstotliwościowej, choć z drugiej strony wyniki prób nadprogowych wskazujące na odbiorcze, ślimakowe uszkodzenie słuchu wiążą się przede wszystkim z pogorszeniem selektywności częstotliwościowej.

2.1. Metody badań części peryferyjnej układu słuchowego

W znakomitej większości przypadków uszkodzenia słuchu dotyczą dysfunkcji w obrębie ucha wewnętrznego i najczęściej spowodowane są starzeniem całego organizmu, w tym układu słuchowego. Nazywa się to uszkodzeniem odbiorczym ślimakowym, lub czuciowo-nerwowym [10]. Ponadto, czuciowo-nerwowe uszkodzenia słuchu są dość często następstwem narażenia na hałas o dużym poziomie dźwięku [11, 12].

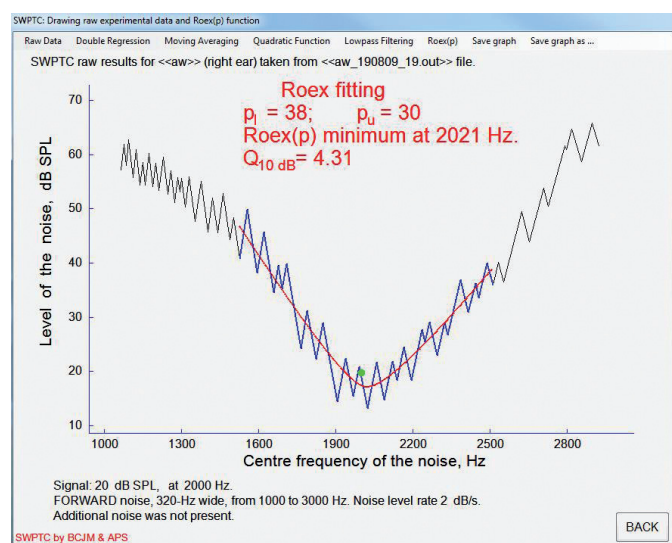
Najlepszym odwzorowaniem selektywności częstotliwościowej są parametry filtrów słuchowych które stanowią podstawy wszystkich modeli słyszenia. Działanie błony podstawnej i komórek słuchowych można zamodelować jako proces filtrowania sygnału wejściowego przez zbiór pasmowoprzepustowych filtrów. Filtry słuchowe mają określone częstotliwości środkowe, szerokości i nachylenia zboczy. Najczęściej stosowaną funkcją do opisu charakterystyki filtra słuchowego jest funkcja eksponencjalna typu roex [13-16]. Na rys. 1 zamieszczono przykładowe charakterystyki filtrów słuchowych, dla słuchu prawidłowego.



Rys. 1. Charakterystyki częstotliwościowe filtrów słuchowych o częstotliwościach 0,5, 1 i 4 kHz

Można zauważyć, że wraz ze wzrostem częstotliwości, zwiększa się szerokość pasma przepustowego filtra. Odzwierciedla to efekt zmniejszania rozdzielczości częstotliwościowej wraz ze wzrostem częstotliwości. Klasyczna metoda wyznaczania charakterystyki filtrów słuchowych jest czasochłonna i nie

nadaje się do wykorzystania jako metoda diagnostyczna [17]. Sęk i in. [13] opracowali tzw. szybką metodę wyznaczania psychofizycznych krzywych strojenia (SWPTC) przy pomocy której istnieje możliwość wyznaczania również charakterystyk filtrów słuchowych. Metoda polega na wyznaczaniu progu spostrzegania tonu na tle pasma szumu o przestrajanej w sposób ciągły częstotliwości środkowej, z zachowaniem ustalonej szerokości pasma szumu. Pojedynczy pomiar trwa kilka minut i umożliwia wyznaczenie takich parametrów filtra słuchowego, jak dobroć (Q10), nachylenie zboczy i częstotliwość środkowa. Na rys 2 zamieszczono przykładowy wynik pomiaru (linia ząbkowana) i dopasowaną do wyników charakterystykę filtra słuchowego z jego parametrami.



Rys. 2. Przykład psychofizycznej krzywej strojenia z dopasowaną charakterystyką filtra słuchowego wg. funkcji roex, na podstawie [13, 47]

Znajomość charakterystyk filtrów słuchowych u danej osoby oprócz oceny stopnia pogorszenia selektywności częstotliwościowej może stanowić bardzo ważną informację w opracowywaniu algorytmów obróbki sygnałów wykorzystywanych w aparatach słuchowych, gdyż można wówczas zastosować między innymi techniki zwiększania kontrastu widmowego, w celu poprawy spostrzegania sygnałów na tle zakłóceń [18, 19].

Należy podkreślić, że metoda SWPTC - sweeping noise, psychophysical tuning curve, nakierowana jest przede wszystkim na diagnozowanie tzw. martwych obszarów ślimaka (ang. cochlear dead region) [13, 20]. Martwe obszary ślimaka, to miejsca w ślimaku ucha wewnętrznego w których całkowitemu uszkodzeniu uległy wewnętrzne komórki słuchowe (IHC), lub połączenia neuronów w obrębie IHC. Najczęściej uszkodzeniom ulega część IHC odpowiedzialna za przetwarzanie sygnału w zakresie większych częstotliwości. Konsekwencją tego typu uszkodzenia jest brak stymulacji elementów drogi słuchowej powyżej IHC, związanych z tym pasmem częstotliwości któremu odpowiadają uszkodzone wewnętrzne komórki słuchowe. Zatem stymulacja słuchu dźwiękami których pasmo częstotliwości przypada na uszkodzony zakres IHC nie wywoła wrażenia dźwiękowego, a przy wzmacnianiu dźwięku w tym

paśmie częstotliwości może prowadzić do pogorszenia percepcji sygnału, np. mowy na tle szumu.

Inną, dość skuteczną metodą wyznaczania martwych obszarów ślimaka jest pomiar progów spostrzegania tonów o różnych częstotliwościach na tle specjalnie skonstruowanego maskera, tzw. TEN-threshold-equalizing noise, stąd nazwa metody TEN [21, 22]. W przypadku braku martwych obszarów próg spostrzegania tonu na tle szumu jest równy wartości poziomu szumu TEN, gdy zaś wystąpi martwy obszar wówczas przyrost progów na tle szumu TEN jest większy niż 10 dB. Czas potrzebny na diagnostykę martwych obszarów ślimaka w przypadku metody SWPTC i TEN jest porównywalny i wynosi kilkanaście minut. Audiogramy tonalne o bardzo stromo opadającej funkcji progów słyszenia mogą stanowić pewne przesłanki do występowania martwych obszarów w paśmie wysokich częstotliwości.

2.2. Spostrzeganie czasowych zmian w sygnale

Spostrzeganie czasowych zmian w sygnale jest ważną funkcją układu słuchowego i można ją oceniać stosując klasyczne metody wyznaczania progów spostrzegania przerw czasowych w sygnale, lub pomiary czasowej funkcji przeniesienia modulacji, tzw. TMTF – temporal modulation transfer function [23]. W ostatnich latach jednak wiele uwagi poświęcono na rozwój nieco innych metod badawczych, również nakierowanych na badanie możliwości spostrzegania zmian czasowych sygnału, ale zmian zawartych w tzw. strukturze subtelnej sygnału (TFS – temporal fine structure) [24, 25]. Subtelna struktura sygnału odnosi się do chwilowych zmian wartości ciśnienia akustycznego w czasie, co w układzie słuchowym kodowane jest na strukturę czasową wyładowań neuronowych i jest m. in. odpowiedzialne za percepcję wysokości dźwięku oraz proces segregacji sygnału mowy na tle szumu, a w przypadku percepcji dwuosusznej za zdolność do lokalizacji źródła dźwięku w przestrzeni. Ubytki słuchu, a także procesy starzenia wpływają na progi spostrzegania TFS. W konsekwencji pogorszeniu ulega zdolność do lokalizacji dźwięku w przestrzeni i percepcji mowy na tle zakłóceń [25].

Pomiar progów spostrzegania zmian TFS można zrealizować przy pomocy metody opracowanej przez Moore'a i Sęka [24]. Badanie polega na detekcji zmian częstotliwości w wielotonie harmonicznym polegających na odstrojeniu od częstotliwości harmonicznej każdej ze składowych o tę samą wartość. Prezentowanie na przemian wielotonu harmonicznego i nieharmonicznego może wywołać zmiany melodii, które podlegają detekcji przez osobę badaną. Wyniki badań wskazują na istotne podwyższenie progów spostrzegania zmian TFS u osób z ubytkami słuchu, jak i również u osób starszych, gdzie dominującym czynnikiem jest proces starzenia organizmu i zaburzenia przetwarzania słuchowego [24]. Warto też dodać, że przy pomocy badania TFS można wykazać zalety wieloletniego treningu słuchowego, szczególnie wśród profesjonalnych muzyków, co przekłada się na znacznie niższe progi spostrzegania zmian TFS aniżeli u niemuzyków [26].

2.3. Problem szumów usznych

W ramach badań wstępnych słuchu (wywiad) oprócz określonego stopnia niedosłuchu dość często pojawia się problem szumu usznego (tinnitus). Zjawisko szumów usznych, szczególnie tych, które występują najczęściej, czyli szumów subiektywnych odnoszą się do słuchowej percepcji fantomowej. Tinnitus jest dokuczliwym i irytującym wrażeniem słuchowym nie związanym z obecnością źródła dźwięku. Zjawisko to do tej pory jest dużym wyzwaniem dla protetyków słuchu i audiologów, zarówno w kwestii diagnostyki, jak i rehabilitacji. Problem szumów usznych dotyka ok. 20% populacji osób dorosłych, natomiast dla ok 2% tinnitus jest poważnym problemem, znacząco obniżającym komfort życia [27-29].

Szумы uszne ze względu na złożoność zjawiska rzutują na funkcje układu słuchowego na różnych etapach przetwarzania. Według neurofizjologicznego modelu tinnitusa o powstaniu wrażenia szumów usznych decydują w głównej mierze na początku zaburzenia funkcjonowania ślimaka ucha wewnętrznego, jako efekt niedostatecznej stymulacji ośrodkowej części układu słuchowego, co w konsekwencji prowadzi do kompensacji tego niedostymulowania i powstania wrażenia szumu usznego [28].

Diagnostyka szumów usznych sprowadza się do standardowych procedur zrównywania wrażenia szumu usznego z dźwiękiem generowanym z określonego urządzenia (audiometr, generator szumu, itp.). Metoda porównywania umożliwia scharakteryzowanie szumu usznego poprzez parametry fizyczne sygnału porównawczego, tzn. rodzaj sygnału (ton/szum), częstotliwość, szerokość pasma szumu i minimalny poziom maskowania (MML – minimum masking level). W metodzie tej najczęściej stosuje się audiometr jako źródło dźwięku porównawczego. Ze względu na ograniczony zakres rodzajów sygnałów generowanych przez audiometr osoba badana może mieć problem z dostrojeniem wrażenia tinnitusa do wrażenia generowanego dźwięku z urządzenia. Dodatkowym problemem jest także wyznaczenie wartości MML, gdyż tinnitus w niektórych przypadkach nie podlega tym samym regułom maskowania, jak ma to miejsce w przypadku sygnałów rzeczywistych. Badania krzywych strojenia tinnitusa (TTC - tinnitus tuning curve) wykazały praktycznie brak efektu strojenia w dziedzinie częstotliwości, co świadczy o procesie maskowania szumu usznego odbiegającym od klasycznego wzorca (audiogramu maskowania).

Szумы uszne mogą stanowić także czynnik pogarszający zrozumiałość mowy. Najłatwiej można to wykazać w przypadku osób które cierpią na szумы uszne, natomiast progi słyszenia mają w normie. Wyniki takich badań zamieszczone m. in. w pracach [30, 31] jednoznacznie wskazały, że osoby cierpiące na szумы uszne mają podwyższone progi rozumienia mowy, zwłaszcza, gdy mowa jest prezentowana na tle szumu. Jedną z interpretacji negatywnego wpływu szumów usznych na zrozumiałość mowy jest zwiększenie tzw. wysiłku słuchowego, czyli stopnia zaangażowania procesów skupienia i koncentracji uwagi w trakcie rozumienia mowy [30, 32, 33].

2.4. Ocena zdolności poznawczych i wysiłku słuchowego

Pojęcie „zdolności poznawcze” jest bardzo szerokie i odnosi się do wszystkich funkcji naszego mózgu, które umożliwiają nam poznawać otoczenie, zapamiętywać informacje, selekcjonować docierające do nas bodźce, rozumować logicznie, itd. Procesy starzenia organizmu wpływają na osłabienie wydolności funkcji poznawczych poprzez gorsze funkcjonowanie systemu nerwowego, a dodatkowo występujące ubytki słuchu pogłębiają te deficyty. Uchida i in. [34] w swojej publikacji wykazali zależność pomiędzy procesami powodującymi starcze ubytki słuchu i częściową utratą zdolności poznawczych. Stwierdzili oni, że stosowanie aparatów słuchowych może spowolnić procesy starczej demencji i opóźnić pogorszenie zdolności poznawczych. W odniesieniu do układu słuchowego, miarą zdolności poznawczych jest tzw. wysiłek słuchowy (ang. listening effort). Wysiłek słuchowy w badaniach najczęściej odnoszony jest do określonej skali, która jest jego ilościową miarą. Najczęściej sygnałem testowym w badaniach wysiłku słuchowego jest mowa prezentowana na tle zakłóceń o różnym poziomie. Van Esch i Dreschler [35] badali wysiłek słuchowy u osób ze słuchem prawidłowym i z odbiorczymi ubytkami słuchu (opadający audiogram) stosując test zdaniowy na tle szumu stacjonarnego i fluktuującego, o różnych wartościach stosunku sygnału do szumu (SNR – signal to noise ratio), tzn. -5dB oraz 5 dB. Wyniki badań wskazały na ponad dwukrotny wzrost wysiłku słuchowego w grupie osób z ubytkami słuchu, szczególnie, gdy masker był szumem o fluktuującej obwiedni amplitudowej. Oceny zdolności poznawczych można także dokonać wykonując tzw. test leksykalny który polega na rozpoznawaniu wyrazów od nie wyrazów (zbioru liter nie tworzących znaczenia -wyrazu) w jak najkrótszym czasie. W ocenie wyniku testu bierze się pod uwagę liczbę poprawnych odpowiedzi oraz czas potrzebny na ich udzielenie. Wyniki badań z wykorzystaniem tego testu zamieszczono w pracy [35]. Rezultaty badań wskazały na większy procent poprawnych odpowiedzi uzyskany w krótszym czasie dla osób ze słuchem prawidłowym w porównaniu do grupy osób z ubytkami słuchu. Oznacza to, że wyniki testu nie bazującego na dźwiękach również wskazują na deficyty funkcji poznawczych u osób z ubytkami słuchu. Trudna do rozstrzygnięcia pozostaje kwestia wpływu ogólnej kondycji funkcji poznawczych danej osoby na wydolność słuchową, szczególnie w odniesieniu do dźwięków mowy. Przedstawione do tej pory różne metody badania słuchu sprowadzają się do jednego z najważniejszych aspektów, tzn. zrozumiałości mowy na tle zakłóceń.

2.5. Zrozumiałość mowy na tle dźwięków zakłócających

Zapewne nie wyolbrzymionym będzie stwierdzenie, że testy zrozumiałości mowy, szczególnie na tle zakłóceń można uznać za optymalne narzędzia do całościowej oceny wydolności słuchu. Na stopień rozumienia mowy wpływają wymienione w poprzednich rozdziałach niniejszej pracy takie czynniki jak pogorszona selektywność częstotliwościowa, gorsza rozdzielczość czasowa, szумы uszne i obniżone zdolności poznawcze. Co do rodzajów materiałów testowych stosowanych w badaniach zrozumiałości mowy stosuje się najczęściej wyrazy, lub zdania. W przypadku wyrazów mogą to być cyfry

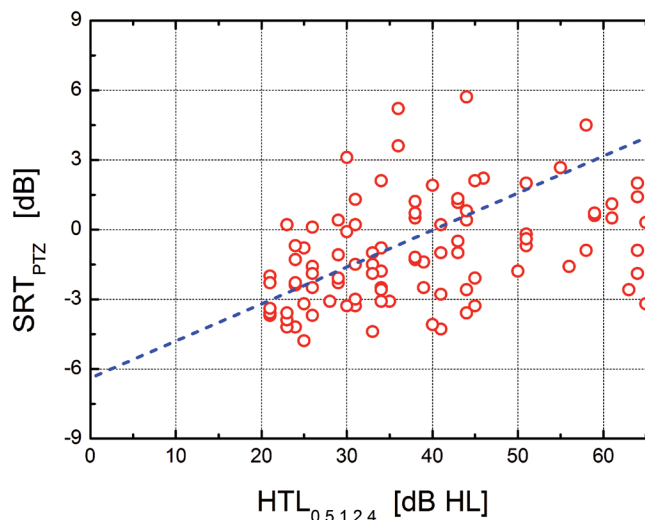
albo liczby [36] lub słowa jedno-, bądź dwusylabowe [37, 38]. Jeśli chodzi o testy zdaniowe, to mogą być to krótkie zdania o zróżnicowanej liczbie wyrazów [39] lub tzw. testy macierzowe o ustalonej strukturze zdań i takiej samej liczbie wyrazów w zdaniu [40-43]. W praktyce protetycznej i audiologicznej wykorzystywane są najczęściej testy liczbowe i wyrazowe, prezentowane bez dodatkowych sygnałów maskujących. Testy te mają dużą wartość diagnostyczną, lecz ich stosowanie nie odzwierciedla rzeczywistych warunków percepcji mowy na tle innych sygnałów (mówców, różnego rodzaju szumów maskujących, itp.). Dlatego też często w praktyce obserwuje się duże rozbieżności pomiędzy oceną stanu słuchu danej osoby bazującą na wynikach audiometrii tonalnej, a jej sprawnością słuchu w warunkach rzeczywistych. Ponadto testy zrozumiałości mowy na tle szumu mogą stanowić jedną z optymalnych metod weryfikacji dopasowanych aparatów słuchowych.

Dla lepszego przybliżenia problemu dużych rozbieżności pomiędzy wynikami badań audiometrii tonalnej, a oceną zrozumiałości mowy na tle zakłóceń przedstawiono wyniki badań własnych autora, z których część została opublikowana w pracy [31]. W Instytucie Akustyki UAM opracowano kilka rodzajów testów do badań zrozumiałości mowy, m.in. Polski Test Zdaniowy (PTZ) [39], Polski Test Zdaniowy typu Matrix (PTZM) [40] oraz Polski Test Trypletów Cyfrowych (PTTC) [36]. PTZ zawiera 37 list 13-zdaniowych. Materiał jest zrównoważony fonematycznie i statystycznie i neutralny semantycznie. Zdania zawierają nie więcej niż 9 sylab i nie więcej niż 7 wyrazów. Z kolei PTZM ma ograniczony materiał lingwistyczny. Składa się z dziesięciu pięciowyrazowych zdań oznajmujących o stałej strukturze, tzn. podmiot, orzeczenie, liczebnik, przymiotnik i dopełnienie. Zdania tworzone są na skutek losowania słów z macierzy 50 wyrazów. PTTC ma najbardziej zawężony materiał lingwistyczny, składa się z 10 wyrazów będących cyframi od 0 do 10, prezentowanych w teście jako trójki cyfr (stąd nazwa tryplety cyfrowe). W testach zastosowano sygnał maskujący w postaci dźwięku będącego efektem wielokrotnego sumowania materiału testowego, tzw. dźwięk babble noise. Najważniejsze cechy maskera typu babble to: struktura widmowa szumu odpowiadająca średnim widmom dźwięków mowy zawartych w testach oraz obecność składowych w widmie modulacyjnym z zakresu kilku do kilkunastu Hz. Wynikiem testu jest próg rozumienia mowy (SRT), czyli taka wartość stosunku poziomu ciśnienia akustycznego dźwięku mowy do poziomu szumu maskującego, dla którego procent poprawnych odpowiedzi w teście wynosi 50%. W testach zastosowano procedurę adaptacyjną z regułą decyzyjną 1 up/1 down [44]. Oznaczało to, że po udzieleniu odpowiedzi poprawnej wartość SNR była zmniejszana, a po jednej niepoprawnej zwiększana. Początkowa wartość zmiany SNR wynosiła 2 dB, która zmniejszała się do 1 dB po dwukrotnej zmianie typu odpowiedzi. SRT wyznaczano jako średnią arytmetyczną z wartości SNR uzyskanych po zmianie procedury adaptacyjnej na mały krok.

W badaniach, których wyniki zamieszczono w niniejszej pracy wzięły udział 84 osoby, z szumami usznymi oraz z szumami usznymi i ubytkami słuchu. Wiek badanych osób wynosił od 20 do 71 lat, mediana 41 lat. Wyniki badań tympanometrycznych wykazały u wszystkich badanych brak dysfunkcji w obrębie ucha środkowego. W ramach badań wstępnych

przeprowadzono wywiad i badania audiometryczne. Jeden z najistotniejszych wniosków z pracy [31] dotyczył istotnego pogorszenia rozumienia mowy na tle szumu u osób z szumami usznymi i bez ubytków słuchu. Jednak niniejsza praca porusza m. in. problem relacji pomiędzy audiometrycznym progiem słyszenia, a stopniem rozumienia mowy. Na rys. 3 zamieszczono zależność pomiędzy progiem rozumienia mowy z testu PTZ a średnim progiem słyszenia dla częstotliwości 0.5, 1, 2 i 4 kHz.

Poszczególne punkty są wartościami SRT uzyskanymi przez wszystkie osoby, których średni próg słyszenia przekraczał 20 dB HL. Linia przerywaną zaznaczono zależność w postaci funkcji liniowej którą zaproponowali Plomp i Duquesnoy [45] w swoim modelu opisującym relacje pomiędzy progiem rozumienia mowy, a progami słyszenia. Plomp i Duquesnoy stwierdzili, że pogorszenie rozumienia na tle szumu o 3 dB jest gorsze w skutkach, aniżeli pogorszenie progu rozumienia mowy w ciszy o 20 dB.



Rys. 3. Wartości SRT w zależności od średniego progu słyszenia (HTL). Linia przerywaną zaznaczono wynik modelowania uzyskany przez Plomp i Duquesnoy [45]

Zależność pomiędzy SRT a średnim progiem słyszenia (a właściwie jej brak) jest kwintesencją problemu poruszanego w niniejszej pracy. Średnia wartość SRT dla słuchu prawidłowego, wg danych z pracy [39] wynosi -6.1 dB, odchylenie standardowe SD=1.6 dB. Zakładając normalność rozkładu można przyjąć, że w przedziale od -2SD do 2SD znajduje się 95% wyników dla słuchu prawidłowego. Zatem jeśli wartość SRT jest mniejsza od -2.9 dB wynik badania można uznać za wartość dla słuchu prawidłowego. Z danych zamieszczonych na rys. 3 wynika, że wartości SRT w zdecydowanej większości są większe od -2.9 dB, co świadczy o pogorszeniu zrozumiałości mowy. Należy podkreślić bardzo duży rozrzut wyników, np. dla średniego progu słyszenia z zakresu 30 – 40 dB, próg rozumienia mowy dla kilku przypadków jest taki, jak dla słuchu prawidłowego, a dla innych osób osiąga znacznie większe wartości SRT, rzędu kilku dB, podobne jak dla średnich progów słyszenia 50, 60 dB. Zatem istnieje uzasadniona potrzeba włączenia badań zrozumiałości mowy na tle szumu na etapie badań audiometrycznych.

3. Podsumowanie. Propozycje badań wchodzących do procedury tworzenia profilu słuchowego

Tematyka badawcza dotycząca tworzenia zbioru procedur diagnostycznych wymaganych do określenia profilu słuchowego (AP) była podejmowana m. in. przez Van Esch i in. [35]. Autorzy tej pracy podjęli się utworzenia zbioru procedur diagnostycznych które można byłoby stosować w różnych krajach, dla różnych języków. Zaproponowali zbiór 9 badań składający się na zestaw do określenia profilu słuchowego osoby badanej. Całkowity czas potrzebny na przeprowadzenie tych badań wyniósł 90 min. Badania obejmowały ocenę: głośności, rozdzielczości częstotliwościowej i czasowej, słyszenia przestrzennego, zdolności poznawczych, wysiłku słuchowego i zrozumiałości mowy w szumie. W badaniach wzięły udział osoby z czterech krajów, tzn. Niemiec, Szwecji, Wielkiej Brytanii i Holandii. Nie stwierdzono istotnego wpływu języka jakim posługiwały się osoby badane na uzyskane rezultaty badań, więc w konkluzji autorzy pracy przyjęli, że proponowany zestaw badań słuchu jest punktem wyjścia do stworzenia międzynarodowych spójnych procedur składających się na określenie profilu słuchowego. Badania nad opracowaniem AP kontynuowali Van Esch i Dreschler [46]. Celem ich badań było określenie zależności pomiędzy zrozumiałością mowy w szumie a czasową i częstotliwościową rozdzielczością słuchu, głośnością i funkcjami poznawczymi. Największą korelację uzyskano pomiędzy wynikami SRT a wynikami oceny objawu wyrównania głośności. Ponadto autorzy tej pracy wykazali dużą korelację pomiędzy progiem rozumienia mowy, rozdzielczością czasową i częstotliwościową słuchu. Ponieważ w pomiarach SRT wykorzystywano dwa rodzaje maskerów: szum stacjonarny i szum zmodulowany amplitudowo, opracowano dwa modele szacowania wartości SRT. Modele bazowały na funkcji regresji liniowej. Rezultaty modelowania pokazały, że w zależności od czynników branych pod uwagę, tzn. próg słyszenia, wiek, nachylenie audiogramu, próg rozdzielczości czasowej, itd. zgodność wyników modelu i wyznaczonych z pomiarów wartości SRT stanowi nie więcej niż 60 % przypadków. Jeden z najistotniejszych wniosków z pracy [46] odnoszący się do niniejszej pracy to konieczność wykonania badania zrozumiałości mowy na tle szumu, uzupełnionego w zależności od potrzeb dodatkowymi badaniami w celu rzetelnego wyznaczenia wydolności słuchu danej osoby. Innymi słowy w diagnostyce i rehabilitacji słuchu badanie zrozumiałości mowy na tle zakłóceń jest niezmiernie istotne i nie można go zastąpić/uzupełnić innymi rodzajami badań, bez względu na stopień ich skomplikowania.

Przygotowując zestaw badań mający określić profil słuchowy danej osoby należy wziąć pod uwagę kilka istotnych czynników. Po pierwsze specyfikę danej jednostki, tzn. czy jest to punkt protetyczny, przychodnia lekarza otolaryngologa, czy też większe jednostki, tzn. katedry, instytuty, kliniki działające w ramach uczelni medycznych lub innych specjalizujących się w badaniach słuchu i rehabilitacji słuchowej. Po drugie możliwości czasowe i aparaturowe danej jednostki. Obecnie aparatura do badań słuchu coraz częściej bazuje na oprogramowaniu obsługującym dane urządzenie lub urządzenia, co daje możliwości dostosowania software'u do konkretnych potrzeb. Zatem niekiedy większym problemem jest czas jaki można poświęcić na badanie jednego pacjenta (zmęczenie i dekon-

centracja osoby badanej) oraz możliwości czasowe i kadrowe danej jednostki. Niezależnie od czynników ograniczających, przede wszystkim głównym celem jest jak najskuteczniejsza pomoc osobie z niedosłuchem.

Zatem w najprostszej wersji zestaw badań pozwalający określić profil słuchowy oprócz wywiadu i audiometrii tonalnej powinien zwiierać badanie mową w ciszy [37, 38] i skryningowy test zrozumiałości mowy na tle szumu PTZM [40], ewentualnie PTTC [36]. W przypadku gdy progi słyszenia w niektórych pasmach częstotliwości osiągają duże wartości, rzędu 80 dB HL i więcej (szczególnie stromo opadające funkcje audiogramu) należy do badań włączyć jedną z metod wyznaczania martwych obszarów ślimaka ucha wewnętrznego. Może być to test TEN [21, 22], obecnie implementowany w klinicznych wersjach audiometrów, lub też oprogramowanie SWPTC [13, 47] do wyznaczania martwych obszarów ślimaka na podstawie psychofizycznych krzywych strojenia. Ze względu na dość powszechny problem występowania szumów usznych, należy wszystkim osobom cierpiącym na szumy uszne wyznaczyć podstawowe parametry tinnitusa.

W przypadkach, gdy badania odbywają się w większych i bardziej wyspecjalizowanych jednostkach, do zestawu badań można włączyć wyznaczanie charakterystyk filtrów słuchowych [13, 47], pomiar SRT w oparciu o Polski Test Zadaniowy (PTZ) [39], badanie progów spostrzegania zmian TFS [24] oraz oceny zdolności poznawczych i wysiłku słuchowego, co jest szczególnie ważne w badaniach osób starszych.

Osoby aparaturowane oczekują realnej poprawy słyszenia i oprócz ich subiektywnej całościowej oceny dopasowania aparatów, która jest kluczowa, nie bez znaczenia jest przedstawienie argumentów jednoznacznie pokazujących korzyści z aparaturowania. Jednym ze sposobów jest wykorzystanie testu zrozumiałości mowy w szumie bez aparatów i po zaaparaturowaniu, pokazując korzyści z poprawy rozumienia mowy w trudnych warunkach akustycznych, podparte konkretnymi wartościami zmiany SRT.

Bibliografia

1. Furmann, A., Metody subiektywne badania słuchu, w Protetyka Słuchu, E. Hojan, Editor 2017, Wydawnictwo Naukowe UAM: Poznań.
2. Mathers, C., Smith, A. and Concha, M., Global burden of hearing loss in the year 2000. 2000; Wytyczne WHO]. Available from: https://www.who.int/healthinfo/statistics/bod_hearingloss.pdf.
3. Dz.U. Nr 105, p., Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 czerwca 2009 r. w sprawie wykazu chorób zawodowych, szczegółowych zasad postępowania w sprawach zgłaszania podejrzenia, rozpoznawania i stwierdzania chorób zawodowych oraz podmiotów właściwych w tych sprawach, 2009.

4. Yates, G.K., Frequency selectivity in the auditory periphery, in *Frequency Selectivity in Hearing*, B.C.J. Moore, Editor 1986, Academic Press: London. p. 1-50.
5. Glasberg, B.R. and Moore, B.C.J., Frequency selectivity as a function of level and frequency measured with uniformly exciting notched noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2000. 108: p. 2318-2328.
6. Meddis, R. and O'Mard, L., A computational algorithm for computing nonlinear auditory frequency selectivity. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2001. 109: p. 2852-2861.
7. Florentine, M. and Buus, S., Temporal resolution as a function of level and frequency. *Proc. 11th Int. Cong. Acoust.*, 1983. 3: p. 103-106.
8. Moore, B.C.J., Temporal resolution in normal and impaired hearing, in *Contributions to Psychological Acoustics*, A. Schick, Editor 1993, Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg: Oldenburg. p. 137-153.
9. Sęk, A., Percepcyjna analiza dźwięku w układzie słuchowym, in *Protetyka słuchu*, E. Hojan, Editor 2017, Wydawnictwo Naukowe UAM: Poznań.
10. Hojan, E., *Protetyka słuchu 2017*, Poznań: Wydawnictwo Naukowe UAM.
11. Śliwińska-Kowalska, M., Kliniczne i orzecznicze aspekty uszkodzenia słuchu przez hałas, in *Protetyka słuchu*, E. Hojan, Editor 2017, Wydawnictwo Naukowe UAM: Poznań.
12. Preis, A. and Gołębiewski, R., Wpływ hałasu na organizm ludzki, w *Protetyka słuchu*, E. Hojan, Editor 2017, Wydawnictwo Naukowe UAM: Poznań.
13. Sęk, A., et al., Development of a fast method for determining psychophysical tuning curves. *Int J Audiol*, 2005. 44(7): p. 408-20.
14. Glasberg, B.R. and Moore, B.C., Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data. *Hear Res*, 1990. 47(1-2): p. 103-38.
15. Moore, B.C. and Glasberg, B.R., Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwidths and excitation patterns. *J Acoust Soc Am*, 1983. 74(3): p. 750-3.
16. Wicher, A. and Moore, B.C.J., Effect of broadband and narrowband contralateral noise on psychophysical tuning curves and otoacoustic emissions. *J Acoust Soc Am*, 2014. 135(5): p. 2931-2941.
17. Patterson, R.D., Auditory filter shape. *J Acoust Soc Am*, 1974. 55: p. 802-809.
18. Ozimek, E., Identification of spectrally enhanced Polish vowels. *Archives of Acoustics* 32 (3), 2007, p. 561-578.
19. DiGiovanni, J.J., Nelson, P.B. and Schlauch, R.S., A Psychophysical Evaluation of Spectral Enhancement. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 2005. 48: p. 1121-1135.
20. Moore, B.C. and Alcantara, J.I., The use of psychophysical tuning curves to explore dead regions in the cochlea. *Ear Hear*, 2001. 22(4): p. 268-78.
21. Moore, B.C., Glasberg, B.R. and Stone, M.A., New version of the TEN test with calibrations in dB HL. *Ear and hearing*, 2004. 25(5): p. 478-87.
22. Moore, B.C., et al., A version of the TEN Test for use with ER-3A insert earphones. *Ear and hearing*, 2012. 33(4): p. 554-7.
23. Shen, Y., Gap detection and temporal modulation transfer function as behavioral estimates of auditory temporal acuity using band-limited stimuli in young and older adults. *Journal of speech, language, and hearing research : JSLHR*, 2014. 57(6): p. 2280-92.
24. Moore, B.C. and Sęk, A., Development of a fast method for determining sensitivity to temporal fine structure. *International journal of audiology*, 2009. 48(4): p. 161-71.
25. Moore, B.C.J., Effects of Age and Hearing Loss on the Processing of Auditory Temporal Fine Structure. *Advances in experimental medicine and biology*, 2016. 894: p. 1-8.
26. Tarnowska, E., Wicher, A. and Moore, B.C.J., The effect of musicianship, contralateral noise, and ear of presentation on the detection of changes in temporal fine structure. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2019. 146(1).
27. Eggermont, J.J., *Tinnitus. Springer handbook of auditory research*, 2012, New York: Springer.
28. Jastreboff, P.J., *Tinnitus retraining therapy. Progress in brain research*, 2007. 166: p. 415-23.
29. Niedzielski, A. and Kędzierawska, S., Tinnitus – current literature review. *Nowa Audiofonologia*, 2017. 6(4): p. 9-15.
30. Degeest, S., Keppler, H. and Corthalsa, P., The Effect of Tinnitus on Listening Effort in Normal-Hearing Young Adults: A Preliminary Study. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 2017. 60: p. 1036-1045.
31. Wicher, A., Ozimek, E. and Szymiec, E., Speech Intelligibility Measurements in Tinnitus Patients with and without Hearing Loss. *Acta Physica Polonica A*, 2010. 118(1): p. 179-182.
32. Gilles, A., et al., Decreased Speech-In-Noise Understanding in Young Adults with Tinnitus. *Frontiers in neuroscience*, 2016. 10: p. 288.
33. Vielsmeier, V., et al., Speech Comprehension Difficulties in Chronic Tinnitus and Its Relation to Hyperacusis. *Frontiers in aging neuroscience*, 2016. 8: p. 293.

34. Uchida, Y., et al., Age-related hearing loss and cognitive decline - The potential mechanisms linking the two. *Auris, nasus, larynx*, 2019. 46(1): p. 1-9.
35. Van Esch, T.E., et al., Evaluation of the preliminary auditory profile test battery in an international multi-centre study. *International journal of audiology*, 2013. 52(5): p. 305-21.
36. Ozimek, E., et al., Development and evaluation of Polish digit triplet test for auditory screening. *Speech Communication*, 2009. 51: p. 307-316.
37. Pruszevicz, A., et al., [New articulation lists for speech audiometry. Part II]. *Otolaryngologia polska (The Polish otolaryngology)*, 1994. 48(1): p. 56-62.
38. Pruszevicz, A., et al., [New articulation lists for speech audiometry. Part I]. *Otolaryngologia polska (The Polish otolaryngology)*, 1994. 48(1): p. 50-5.
39. Ozimek, E., et al., Polish sentence tests for measuring the intelligibility of speech in interfering noise. *Int J Audiol*, 2009. 48(7): p. 433-43.
40. Ozimek, E., Warzybok, A. and Kutzner, D., Polish sentence matrix test for speech intelligibility measurement in noise. *International journal of audiology*, 2010. 49(6): p. 444-54.
41. Hochmuth, S., et al., A Spanish matrix sentence test for assessing speech reception thresholds in noise. *International journal of audiology*, 2012. 51(7): p. 536-44.
42. Hey, M., et al., Investigation of a matrix sentence test in noise: reproducibility and discrimination function in cochlear implant patients. *International journal of audiology*, 2014. 53(12): p. 895-902.
43. Houben, R., et al., Development of a Dutch matrix sentence test to assess speech intelligibility in noise. *International journal of audiology*, 2014. 53(10): p. 760-3.
44. Levitt, H., Transformed up-down methods in psychoacoustics. *J Acoust Soc Am*, 1971. 49(2): p. Suppl 2:467.
45. Plomp, R. and Duquesnoy, A.J., A model for the speech-reception threshold in noise without and with a hearing aid. *Scandinavian audiology. Supplementum*, 1982. 15: p. 95-111.
46. Van Esch, T.E. and Dreschler, W.A., Relations Between the Intelligibility of Speech in Noise and Psychophysical Measures of Hearing Measured in Four Languages Using the Auditory Profile Test Battery. *Trends in hearing*, 2015.
47. Moore, B.C. and Sęk, A., A fast method for determining PTCs. 2018; Available from: <https://www.psychol.cam.ac.uk/hearing>.