

**Stavros Hatzopoulos**

Uniwersytet w Ferrarze, ENT dep., Service of Audiology, Włochy

**Antoni Grzanka**

Instytut Podstaw Elektroniki Politechniki Warszawskiej  
Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, Warszawa

## Protokół badań przesiewowych oparty na procedurze liniowego uśredniania trzasku – kryteria oceny sygnału

### Screening Protocol Based on Linear Click Stimuli – Performance and Scoring Criteria

**Słowa kluczowe:** otoemisje akustyczne, TEOAE, badania przesiewowe noworodków, analiza czasowo-częstotliwościowa, kryteria kwalifikacji.

**Key words:** otoacoustic emissions, TEOAEs, neonatal screening, time-frequency analysis, scoring criteria.

#### Streszczenie

Aby poprawić jakość obecnie stosowanej metody rejestracji TEOAE, przeprowadzono porównanie zapisów TEOAE zebranych u noworodków przy użyciu protokołu liniowego z bodźcem typu trzask o poziomie 68 dB SPL i przy użyciu protokołu nieliniowego dla domyślnych ustawień parametrów bodźca w systemie ILO. Z teoretycznego punktu widzenia należało się spodziewać, że pomiary w modzie liniowym powinny dawać odpowiedzi charakteryzujące się wyższym stosunkiem S/N, ponieważ sekwencja bodźca składa się z czterech trzasków o tej samej intensywności i polaryzacji. Materiał obejmuje zapisy z 1416 uszu noworodków (wiek 48 godz.). W danych TEOAE porównano korelację wzajemną, amplitudę odpowiedzi, zaszumienie, poprawioną odpowiedź i S/N, w pasmach: 1, 2, 3, 4 i 5 kHz, stosując test t-Studenta dla zmiennych zależnych. Analiza czasowo-częstotliwościowa wskazuje, że do celów badań przesiewowych można wykorzystać tylko mały segment całej odpowiedzi TEOAE. Ustaliliśmy, że bramkowanie odpowiedzi wywołanych (4-14 ms) z użyciem liniowego protokołu TEOAE mają większe wartości S/N w pasmach TEOAE 2, 3, 4 i 5 kHz, większe estymaty korelacji i wykazują mniejsze poziomy szumu. Ustanowiono jasne progowe kryteria kwalifikacji dla stosunków S/N przy 2, 3 i 4 kHz oparte na konstrukcji jednostronnych nieparametrycznych przedziałów tolerancji.

### Summary

In order to improve the quality of the current TEOAE recording methodologies we have conducted a comparison of TEOAE neonatal recordings acquired with linear protocols using click stimuli of 68 dB SPL and non-linear protocols using the ILO default stimulus values. From a theoretical standpoint it was expected that the linear recordings would generate responses characterized by higher S/N ratios due to fact the stimulus sequence contains four clicks of the same intensity and polarity. The project included recordings from 1416 neonatal ears (age 48 hr). The TEOAE data were compared in terms of correlation, response amplitude, noise, corrected response, and S/N in the 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 kHz bands, using a paired t-test criterion. Time-frequency analyses have indicated that for screening purposes it is possible to utilize only a small segment of the total TEOAE response. We found that windowed (4-14 ms) responses evoked by a linear TEOAE protocol generated superior S/N estimates in the 2.0, 3.0, 4.0 and 5.0 kHz TEOAE bands, superior correlation estimates, and demonstrated lower levels of noise. Clear cut scoring criteria were established for the S/N ratios in the 2.0, 3.0 and 4.0 kHz, by constructing one-sided distribution-free tolerance boundaries.

Po doświadczeniach kilku ostatnich lat, kiedy to techniki badań przesiewowych noworodków z wykorzystaniem TEOAE upowszechniły się z dużym rozmachem, istnieje podstawa dokonania ponownej oceny protokołu TEOAE i jego przeprojektowania. Celem przeprojektowania bieżących protokołów jest osiągnięcie znaczącej poprawy w dwóch obszarach: (1) zwiększenie amplitudy i stosunku sygnał – szum (S/N) zapisów TEOAE oraz (2) znaczące skrócenie czasu rejestracji TEOAE. Rozwiązanie w tym drugim obszarze przedstawił Thornton i współpracownicy [1993], którzy zaproponowali protokół ciągów najmniejszej długości (MLS) (pobudzenie ślimaka dużą liczbą trzasków liniowych). Zaproponowana szybkość stymulacji może osiągnąć wartość 5000 powt./sek., a wymagany czas akwizycji jest znacząco zredukowany. Mimo obiecujących zalet tej propozycji wersja z protokołem MLS nadal nie jest dostępna komercyjnie. Inne alternatywne propozycje biorą pod uwagę przetwarzanie poszczególnych części (okien lub segmentów) odpowiedzi TEOAE [Brass, Kemp 1994; Whitehead (i inni) 1995]. Główne zalety przetwarzania krótszych segmentów TEOAE to (1) zmniejszenie poziomu nałożonego szumu (który dotyczy głównie segmentów > 15 ms) i zwiększenie całkowitego stosunku S/N oraz (2) skrócenie okna akwizycji, które może być pobierane ze zwiększoną częstością pobudzenia; na przykład zapis TEOAE o czasie trwania 10 ms może być zbierany przy 100 powtórzeniach na sekundę w porównaniu z 50 powt./sek. dla domyślnej rejestracji 20,48 ms w ILO. Poza korzystnym zwiększeniem szybkości stymulacji propozycje bramkowanego przetwarzania TEOAE mają te same wady co tradycyjne zapisy nieliniowe (zmniejszenie stosunku S/N o ok. 6 dB), będące efektem czwartego trzasku w szeregu bodźców [Kemp (i inni) 1986].

W poprzednich doniesieniach [Hatzopoulos (i inni) 1998 a; Martini, Hatzopoulos 1998] zasugerowano, że odpowiedzi TEOAE uzyskane u noworodków mogą być zbierane z protokołem korzystającym z bodźców typu liniowy trzask o średnich poziomach (ok. 68 dB p.e. SPL), gdy dane ograniczy się funkcją okna długości 10 ms (4.0-14.0 ms). Takie granice funkcji okna zostały starannie określone na podstawie obrazów analizy czasowo-częstotliwościowej [Cheng 1995] i pokazano, że artefakty bodźca znajdujące się w pierwszych milisekundach zapisu są skutecznie wycinane przez połączone wykorzystanie bodźców o średnim poziomie i funkcji okna. Dwie prace pilotażowe, wspomniane wyżej, pokazały na małej populacji uszu noworodków, że liniowy protokół TEOAE zapewnia wyższe stosunki S/N i mniejsze poziomy szumu dla częstotliwości TEOAE w zakresie 2-5 kHz. Tym niemniej te wyniki mogły różnić się od tych w większej populacji z powodu wysokiej zmienności odpowiedzi TEOAE, która to zmienność nie zawsze jest dostrzegana na małej liczbie przypadków [Hatzopoulos (i inni) 1998 b].

Niniejsza praca pokazuje wyniki porównania zapisów zebranych przy użyciu liniowego i nieliniowego protokołu TEOAE w dużej populacji uszu noworodków. Biorąc pod uwagę fakt, że deskryptory odpowiedzi protokołu liniowego mają duże wartości, uzyskaliśmy silne oszacowanie kryteriów normy na podstawie rozkładów wartości stosunku sygnału do szumu (S/N) w interesujących pasmach TEOAE, które mogą być wykorzystane jako kryteria kwalifikacyjne zapisów u noworodków.

Praca składa się z dwóch części. W pierwszej części prezentujemy wyniki statystyczne porównujące parametry kliniczne (szum, stosunek S/N w pasmach o znaczeniu klinicznym itp.) z zapisów uzyskanych za pomocą protokołów liniowego i nieliniowego, gdzie wykazana jest przewaga zaproponowanego protokołu liniowego. W drugiej części prezentujemy analizę statystyczną rozkładów testowanych zmiennych TEOAE, która może być wykorzystana jako kryterium kwalifikacyjne typu „słyszy” / „nie słyszy”.

Aby uprościć terminologię w tekście, rejestracje wywołane przez protokół liniowy lub nieliniowy są nazywane odpowiednio zapisami liniowymi lub nieliniowymi.

## I. MATERIAŁ I METODA

Zebrane zapisy liniowe i nieliniowe były porównywane poprzez dziewięć parametrów używanych w praktyce klinicznej [Welzel-Müller, Stephan 1994; Dirckx (i inni) 1996]: odpowiedź TEOAE, szum, poprawiona odpowiedź TEOAE (odpowiedź TEOAE – szum), stosunek S/N w pasmach 1.0-5.0 kHz i powtarzalność sygnału (korelacja).

### 1. Grupa badana i protokół zbierania danych

Razem zbadaliśmy 708 noworodków (1416 uszu), zgrupowanych w dwa zbiory danych; pierwszy zawierał 400 przypadków (800 uszu), które były zbadane oboma protokołami TEOAE – liniowym i nieliniowym; drugi zawierał 308 wybranych przypadków (616 uszu), które były zbadane tylko protokołem liniowym. Wszyscy badani byli zweryfikowani jako mający normalnie funkcjonujący obwód ślimakowy poprzez zastosowanie do zapisów TEOAE standaryzowanych kryteriów RIHAP [White (i inni) 1993], co oznaczało, że stosunek S/N dla 2, 3 i 4 kHz przekraczał 3.0 dB.

Wszystkie sesje pomiarowe były prowadzone za pomocą aparatu ILO-92 (wersja programu 4.20 i 5.60). Ta sama liczba pobudzeń była używana do zbierania odpowiedzi nieliniowych i liniowych (maksymalnie domyślnie 260). Zapisy liniowe były uzyskiwane bodźcem o względnym poziomie  $68 \pm 1$  dB p.e. SPL (-16.5 do -15.0 dB ILO), a zapisy nieliniowe bodźcem o względnym poziomie  $82 \pm 1$  dB p.e. SPL (-1.5 do 0 dB ILO). Maksymalny poziom szumu był ustawiony na względnym poziomie 52.0 dB p.e. SPL. Dla zapisów liniowych opcja ILO *alternative polarity* była wyłączona. Zapisy liniowy i nieliniowy były porównywane po zastosowaniu bramkowania po pomiarze z użyciem funkcji okna 4-14 ms (okno kosinusowe z czasem narastania 0,64 ms).

### 2. Metody statystyczne

Dla porównania średnich odpowiedzi liniowej i nieliniowej obliczono 95-procentowe przedziały ufności dla rozkładów normalnych dla różnic w parach dla wszystkich parametrów TEOAE. Mimo że rozkłady różnic par nie były normalne, duża liczba badań zapewnia prawidłowość oszacowania przedziałów.

Aby uzyskać kryteria kwalifikacyjne „słyszy” / „nie słyszy”, obliczyliśmy jednostronne przedziały tolerancji niezależne od rozkładu. Te przedziały zapewniają, że dla poziomu ufności określonego przez użytkownika „M” i określonej przez użytkownika części populacji „P” możemy być w „M” procentach pewni, że obliczony przedział zawiera co najmniej „P” procent obserwacji całej populacji. Prezentujemy te przedziały dla  $M = 95\%$  i  $99\%$  i  $P = 95\%$ . Przedziały niezależne od rozkładu wybrano ze względu na brak normalności rozkładów parametrów.

### 3. Analiza czasowo-częstotliwościowa (TF)

Analiza czasowo-częstotliwościowa pokazuje, jak struktura spektralna sygnału TEOAE zmienia się w czasie, i przedstawia skomplikowany związek między częstotliwościami TEOAE a latencją TEOAE (pełniejszy opis algorytmów TF zawarty jest w towarzyszącej w tym tomie publikacji autorów: Grzanka, Hatzopoulos). Spośród algorytmów TF najbardziej znana jest transformata Wignera-Ville'a, która wykazuje poważne wady praktyczne z powodu występowania składowych interferencyjnych (generowanych przez interakcje różnych składowych częstotliwościowych sygnału TEOAE), utrudniających interpretację reprezentacji TF. Zaproponowano wiele „wygładzonych” wariantów reprezentacji TF, aby rozwiązać ten problem – wśród nich szeregi rozkładów czasowych [Qian, Chen 1993; 1994].

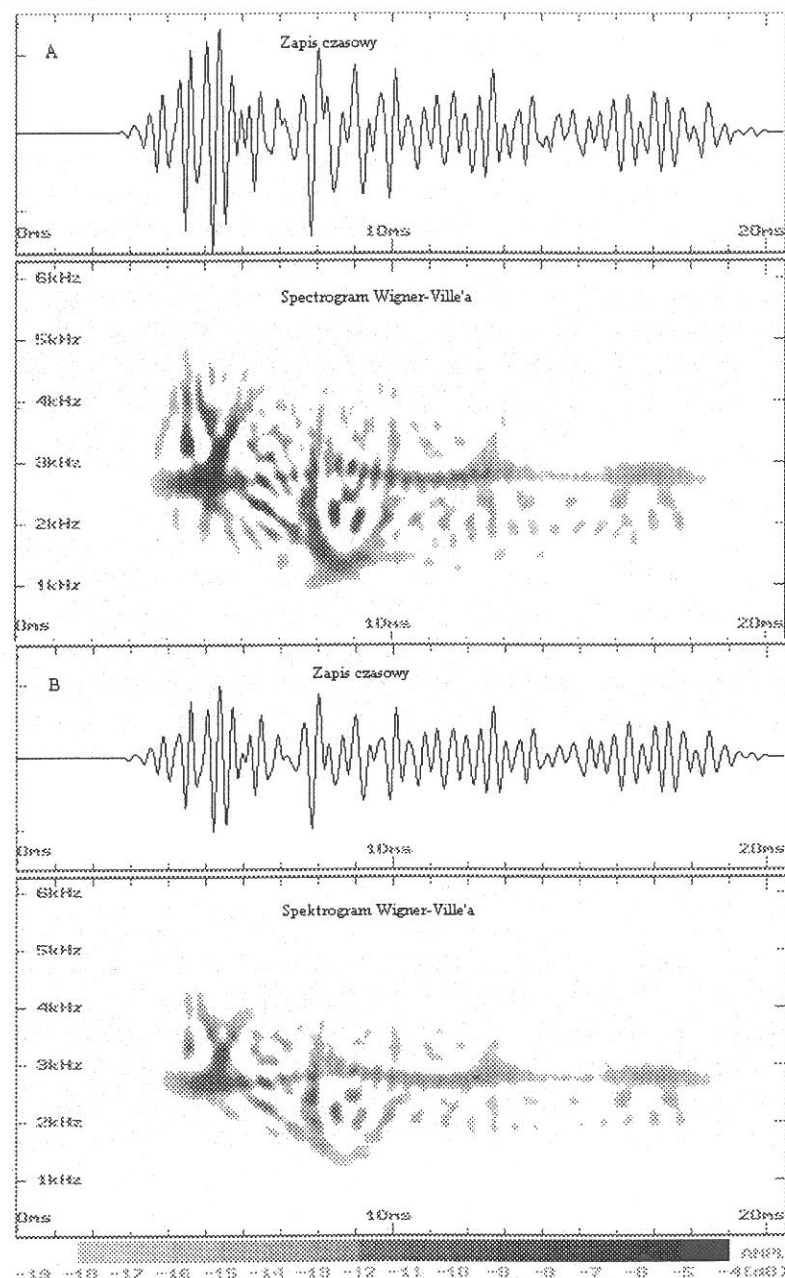
Reprezentacja TF przedstawiona w tekście jest estymatą TF, obliczoną z uśrednienia 50 zapisów losowo wybranych uszu noworodków z wykorzystaniem algorytmu pseudo-Wignera-Ville'a z oknem Kaisera-Bessela o połówkowej długości 8 ms. Przy obliczaniu każdego odwzorowania TF odpowiednia odpowiedź TEOAE była średnią z pojedynczych zapisów ILO o numerach parzystych i nieparzystych (prezentowanych jako bufory A i B na ekranie ILO). W ocenie statystycznej konturów TF składowe częstotliwościowe o amplitudzie widmowej poniżej 30 dB od szczytowej amplitudy widmowej nie były uznawane jako znaczące.

## II. WYNIKI

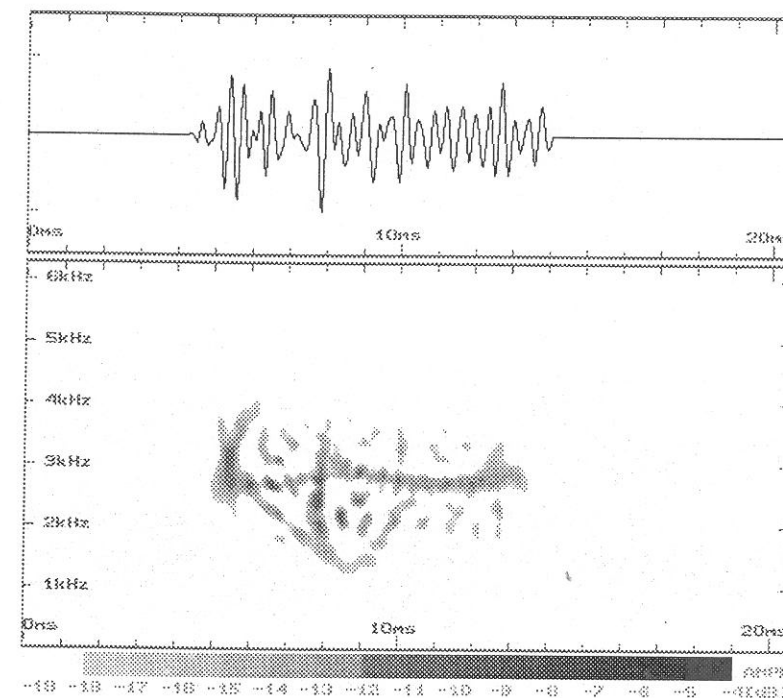
### 1. Określenie okna 4.0-14.0 ms na podstawie obrazu konturów TF

Zastosowana analiza TF była opisana szczegółowo w poprzednich doniesieniach [Hatzopoulos (i inni) 1998 a] i w tym punkcie przedstawione są tylko ważniejsze kroki. We wzrokowej ocenie 50 zapisów liniowych (użytych do obliczenia uśrednionego zobrazowania TF) nie stwierdzono obecności artefaktu bodźca. Zwykle artefakt liniowy widoczny jest na początku zapisu TEOAE jako zestaw składowych niskoczęstotliwościowych [Grandori (i inni) 1994]. Reprezentacje TF z uśrednionych odpowiedzi liniowych i nieliniowych są pokazane na ryc. 1. Kształt konturów TF (składowych wysoko- i niskoczęstotliwościowych) jest podobny w obu reprezentacjach, wskazując na ogólną zgodność między zapisami liniowym i nieliniowym.

Aby wykryć ewentualne resztkowe składowe liniowe, porównano średnie amplitudy widmowe map TF pokazanych na ryc. 1. Po zastosowaniu do danych



Ryc. 1. Wyniki TF dla średnich obliczonych z odpowiedzi TEOAE z 50 uszu noworodków przy użyciu okna 2,5-19,5 ms (obszary ciemniejsze wskazują na wartości widmowe o większej amplitudzie; skala amplitud jest względna i leży w granicach 15 dB; A – dane z nieliniowych odpowiedzi TEOAE; B – dane z liniowych odpowiedzi TEOAE)



Ryc. 2. Dane z ryc. 1 (B) po zastosowaniu okna 4-14 ms (oś pozioma opisuje czas w milisekundach, a pionowa – częstotliwość w kHz)

funkcji okna obliczano statystykę t-Studenta. Kiedy funkcja okna była ustawiona tak, aby włączyć tylko segment 4-19,5 ms, różnice między obiema reprezentacjami TF na niskich częstotliwościach stały się nieistotne. Dla ułatwienia przetwarzania sygnału i w celu zwiększenia stosunku S/N użyliśmy okna o szerokości 10 ms z ustawionym końcem okna na 14 ms. Bramkowana reprezentacja liniowa TF jest pokazana na ryc. 2. Jak oczekiwano, usunięcie dalszej części odpowiedzi (> 14,0 ms) poprawia stosunek S/N sygnału. Mimo wycięcia początkowych 4,0 ms z zapisów TEOAE największa obserwowana składowa częstotliwościowa na ryc. 1 (ok. 4 kHz) jest nadal widoczna na ryc. 2.

## 2. Odpowiedzi liniowe i nieliniowe bramkowane w zakresie 4.0-14.0 ms

Dla wszystkich zmiennych TEOAE skonstruowano 95-procentowe przedziały ufności przy porównywaniu różnic w parach między średnimi w rozważanych populacjach. Te przedziały pokazano w drugiej kolumnie tab. 1. Znaleźiono 139 zapisów, które nie spełniały kryteriów RIHAP i nie zostały

włączone do statystyk porównawczych, ale włączono je do oszacowania specyficzności (zob. punkt poniżej). Większość zbadanych zmiennych TEOAE w modzie liniowym i nieliniowym wykazuje znamienne statystyczną różnicę średnich – oprócz zmiennej S/N\_1 kHz. Różnica średnich zmiennej „odpowiedź” też okazała się znamienna, co przemawiało na korzyść protokołu nieliniowego, ale obserwowana wartość może być wyjaśniona różnicą poziomu bodźca wywołującego (82 w stosunku do 68 dB p.e. SPL). Największą różnicę między protokołami (od -5,7 do -6,07 dB SPL) zaobserwowano dla zmiennej szumu, a najmniejszą różnicę dla zmiennej SN\_2 KHz (od 0,90 do 1,54 dB SPL).

Tab. 1: Wyniki porównania brankowanych zapisów TEOAE u noworodków w modach nieliniowym i liniowym (spośród analizowanych parametrów tylko jeden (SN\_1 kHz) okazał się nieznamienny; w drugiej kolumnie pokazano 95-procentowe przedziały ufności (dolny i górny) różnic między zmiennymi w modzie liniowym i nieliniowym)

Zmienna	Średnie Liniowe a nieliniowe	Przedział ufności L – NL	
		od	do
Odpowiedź	** 18,17 a 22,31	-4,28	-4,00
A-B (szum)	** 5,61 a 11,49	-6,07	-5,70
Sygnal poprawiony	** 12,57 a 10,89	1,43	1,93
SN_1 kHz	nz 2,30 a 2,11	-0,26	0,64
SN_2 kHz	** 17,19 a 15,95	0,90	1,54
SN_3 kHz	** 20,57 a 18,91	1,75	2,33
SN_4 kHz	** 20,42 a 18,14	1,93	2,56
SN_5 kHz	** 12,21 a 10,25	1,56	2,3
Korelacja (%)	** 90,68 a 88,75	2,13	3,27

nz = nieznamienny  
\*\* = znamienny, przy p = 0,05

### 3. Oszacowanie specyficzności

Aby poprawić rozróżnialność efektywności przesiewowej dwóch testowanych protokołów, ocenie poddaliśmy dane w grupach spełniających kryteria „Prawidłowy”, „Częściowo prawidłowy” (dwie spośród trzech zmiennych miały wartości 3 dB powyżej szumu) i „Nieprawidłowy”. Wyniki pokazano w tab. 2. Odpowiedzi liniowe charakteryzowały się wyższym wskaźnikiem specyficzności niż odpowiedzi nieliniowe (87,87% w stosunku 82,62%). W obu protokołach duża liczba zapisów została zakwalifikowana jako nie spełniające kryteriów RIHAP zarówno jako „Częściowo prawidłowe” jak i „Nieprawidłowe”. Trzy czwarte zapisów liniowych było zakwalifikowanych jako „Częściowo prawidłowe”, z czego siedem odpowiadało „Prawidłowym” przypadkom w protokole nieliniowym. W tym drugim protokole 62 zapisów było zakwalifikowanych jako „Częściowo prawidłowe”, z czego 37 odpowiadało przypadkom „Prawidłowym” w liniowym protokole. 63 zapisy z protokołu liniowego i 77 z protokołu nieliniowego (12 było zakwalifikowanych jako „Częściowo prawidłowe” z protokołem liniowym) było zakwalifikowanych jako przypadki „Nieprawidłowe”. Tylko zapisy liniowe, które nie przeszły kryteriów RIHAP, były ponownie zbadane przy użyciu ABR, dając w wyniku wskazania obuusznego lub jednousznego uszkodzenia słuchu.

Tab. 2. Wyniki oceny pierwszego zestawu danych (aby uwydatnić zróżnicowanie wyników klasyfikacji dla obu sprawdzanych protokołów, w kolumnach „Częściowo prawidłowy” i „Nieprawidłowy” pokazano także liczby przypadków tak, jak były one klasyfikowane przez drugi z protokołów)

Protokół	Prawidłowy	Częściowo prawidłowy	Nieprawidłowy	
Liniowy	703 87,87%	34* 4,25%	7* = nieliniowy prawidłowy	63 7,87%
Nieliniowy	661 82,62%	62* 7,75%	37* = liniowy prawidłowy 25* = liniowy część. praw.	77* 9,62% 12* = liniowy część. prawidłowy

### 4. Przedziały tolerancji

Wszystkie zapisy liniowe, które spełniły kryteria RIHAP (1277), zostały użyte do wyznaczenia granic przedziałów tolerancji dla siedmiu z badanych zmiennych TEOAE (wykluczono z rozważań S/N dla 1 kHz i zmienne poprawionej odpowiedzi) – wyniki pokazano w tab. 3. Dla obu różnych wartości M (95% i 99%)

granice tolerancji były dość zbliżone na skutek dużej liczby przypadków wykorzystanych w obliczeniach. Interpretacja tych oszacowań ilustruje następujący przykład. Rozważmy wartość korelacji podanej jako 76% i 75% odpowiednio w pierwszej i drugiej kolumnie. Mamy ufność na poziomie 95% lub 99% ( $M = 95$ ,  $M = 99$ ), że co najmniej 95% ( $P = 95$ ) wartości korelacji w populacji przekracza granice tolerancji odpowiednio na poziomie 76% i 75%.

Zmienne, na których proponujemy oprzeć kryteria oceny, pochodzą z doświadczalnej analizy składowych głównych. Są to wartości stosunku S/N dla 2, 3 i 4 kHz, które wyjaśniły 85% wariancji modelu. Zaproponowane kryteria oceny pokazano w drugiej kolumnie tab. 3 jako podkreślone zmienne.

Tab. 3. Oszacowania jednostronnych przedziałów tolerancji niezależnych od rozkładu dla siedmiu badanych zmiennych TEOAE (proponowane kryteria klasyfikacyjne – podkreślone liczby – są zaznaczone w drugiej kolumnie, gdzie  $P = 95$  i  $M = 99$ )

Zmienna	$P = 95, M = 95$	$P = 95, M = 99$
Korelacja	76,0 %	75 %
S/N 2.0	7 dB	<u>7 dB</u>
S/N 3.0	10 dB	<u>10 dB</u>
S/N 4.0	9 dB	<u>9 dB</u>
S/N 5.0	-1 dB	- 4 dB
Szum TEOAE (A-B)	0,5 dB SPL	0,5 dB SPL
Odpowiedź	8,7dB SPL	7,9 dB SPL

### III. DYSKUSJA

Dane z pierwszego zestawu danych wskazywały, że protokół liniowy daje w odpowiedzi TEOAE o mniejszym poziomie szumu i wyższym stosunku S/N dla częstotliwości 2, 3 i 4 kHz. Tab. 1 pokazuje, że jakość odpowiedzi liniowej jest większa dla prawie wszystkich badanych zmiennych. Oszacowania 95-procentowego przedziału ufności wskazują, że zaobserwowano większe różnice, w porządku malejącym, dla poziomu szumu, korelacji S/N dla 4, 3 i 5 kHz. Ta poprawa jakości zarejestrowanego sygnału przekłada się także na zwiększenie specyficzności. Wymienione tu oszacowanie specyficzności (87,87%) jest niższe od tego, które ostatnio podawano w literaturze [Dirckx (i inni) 1996; Maxon (i inni) 1997; Welch (i inni) 1996] z powodu tego, że tam dane zbierano w jednofazowym programie TEOAE (nie powtarzano badania TEOAE dla odpowiedzi oznaczanych jako „Częściowo prawidłowe” lub „Nieprawidłowe”).

Odpowiedzi TEOAE z pierwszego zestawu danych były zbierane tylko dla określenia najlepszej procedury klinicznej (porównanie protokołów). Dlatego przypadki „Częściowo-Prawidłowe” nie były powtórnie badane. Z danych w tab. 2 widać, że zapisy liniowe z 63 uszu nie spełniały kryteriów RIHAP. Spośród tych 36 zapisów (57,1%) wykazywało S/N dla częstotliwości 3 lub 4 kHz wyższy od 3 dB. Te odpowiedzi TEOAE sugerują, że jednym z dominujących czynników powodujących zwiększoną liczbę fałszywych alarmów jest wysoki poziom szumów otoczenia i własnych pacjenta (poruszanie się badanego noworodka, poruszanie się w bliskości noworodka, wywołujące podwyższenia szumu otoczenia, itd.). Duża liczba fałszywych alarmów uzyskiwana w obu protokołach jest poważną komplikacją w realizacji programu przesiewowego. Z uwagi na fakt, iż największy udział w odrzuceniu przypadku ma duży poziom szumu, problemy te można minimalizować przez poprawę akustyki otoczenia i samego pacjenta. W warunkach klinicznych jednakże takie rozwiązanie może nie mieć zastosowania z tej przyczyny, że procedura przesiewowa jest prowadzona w pokojach, gdzie przebywa wiele noworodków, tworząc złe tło akustyczne. Rozwiązaniem alternatywnym jest zastosowanie dwu- (lub więcej) fazowego programu przesiewowego [McNellis, Klein 1997], gdzie przypadki częściowo poprawne i odrzucone są ponownie i wielokrotnie badane protokołem, poprzedzającym weryfikację ABR.

Wyniki oszacowania przedziałów tolerancji przy ścisłych kryteriach normalności pokazano w tab. 3. Założyliśmy, że do kryteriów oceny: poprawny/niepoprawny można użyć tylko pewnego podzbioru zmiennych. Zmienne reprezentujące ogólne właściwości zapisów TEOAE, takie jak „odpowiedź TEOAE” i „szum TEOAE”, są najprawdopodobniej bardziej efektywne jako wskaźniki momentu, kiedy akwizycja ILO powinna się zatrzymać (zob. kryteria automatyki w ostatniej wersji oprogramowania ILO\*). Stosunek S/N na 5 kHz często charakteryzuje się niską wartością z powodu niekorzystnego wpływu szumów otoczenia i pacjenta (Czytelnik powinien także wziąć pod uwagę na fakt, iż przetworniki ILO zaczynają znacząco tłumić częstotliwości od ok. 5 kHz). Spośród pozostałych zmiennych analiza składowych głównych sugeruje użycie stosunków S/N dla 2, 3 i 4 kHz jako efektywnych kryteriów oceny. W różnych programach [Dirckx (i inni) 1996; White (i inni) 1993] do oceny odpowiedzi TEOAE proponowano użycie wartości korelacji jako dodatkowych do wyżej wymienionych zmiennych. Zmienna „korelacji” jest silnie zależna (wysoce współliniowa) z oszacowaniem stosunków S/N dla 2, 3 i 4 kHz, dlatego jej użycie jako kryterium klinicznego nie zwiększa znamienności procedury klasyfikacyjnej. W dodatku z powodu tego, że zapisy TEOAE nie są stacjonarne [Wit (i inni) 1994] rzeczywista wartość korelacji fluktuuje od jednego segmentu TEOAE do innego segmentu

\* Korzystając z oszacowań amplitudy odpowiedzi (7,9 dB p.e. SPL) i stosunków S/N dla 2, 3 i 4 kHz (odpowiednio 7, 10, 9 dB) można w bieżącej wersji oprogramowania ILO sformułować kryterium automatycznego końca procedury zbierania.

i dlatego oszacowanie korelacji przez ILO jest wysoce obciążonym deskryptorem sygnału.

Oszacowanie granic tolerancji na podstawie dużego zbioru danych dostarcza dokładnych deskryptorów tego, co należy uważać za normalną odpowiedź TEOAE, i te deskryptory mogą być użyte w celu efektywnego rozróżnienia odpowiedzi pochodzących od uszu normalnych i tych z uszkodzonym słuchem. Można by rozszerzyć dokładność przewidywań deskryptorów grupy normalnej, biorąc oszacowanie przedziałów tolerancji dla  $P = 99$ , ale uzyskane estymaty są niskie i nie mogą być uznane jako silne kryteria normalności, szczególnie w hałaśliwym otoczeniu. Proponujemy używanie trzech zmiennych w systemie oceny noworodków, a mianowicie stosunków S/N dla 2, 3 i 4 kHz przy odpowiednio minimalnych wartościach 7, 9 i 10 dB. W programie wykorzystującym te zmienne w ocenie odpowiedzi noworodków można oczekiwać, z wysokim prawdopodobieństwem, że możliwość wyniku fałszywie ujemnego (przypadek uszkodzonego słuchu uznanego jako normalny) jest równa lub niższa od 5%. Zastosowanie silnych kryteriów normalności spowoduje dużą liczbę wyników częściowo poprawnych i niepoprawnych, które muszą być sprawdzone poprzez dodatkowe, ponowne badanie TEOAE. Te 1277 odpowiedzi, których użyto do oszacowania kryteriów, były zebrane w pomieszczeniu o stosunkowo wysokim poziomie szumu w TEOAE (50,2-52,0 dB p.e. SPL). Kryteria te można łatwo zastosować w miejscach o mniejszym lub takim samym poziomie hałasu. W tych miejscach, gdzie hałas przekracza te poziomy hałasu, będzie czasami konieczne wykonanie dodatkowego, ponownego badania.

Konkludując – protokół liniowy z wykorzystaniem bramkowanych odpowiedzi (4-14 ms) dostarcza lepszych deskryptorów sygnału TEOAE, wyrażonych przez niski poziom szumu TEOAE i wyższymi stosunkami S/N TEOAE dla 2, 3 i 4 kHz. Te wyniki wskazują, że protokół liniowy wymaga pobrania mniejszej liczby bloków, co przekłada się na skrócenie czasu badania jednego ucha. Oszacowano ściśle kryteria normalności na podstawie 1277 liniowych zapisów i stosownie zaproponowano, aby do celów kwalifikacji używać tylko kombinacji trzech, wspomnianych wyżej, zmiennych S/N.

### Bibliografia

- Brass D., Kemp D. T., 1994: The objective assessment of transient evoked otoacoustic emissions in neonates. „Ear Hear” 15, 371-377.
- Cheng J., 1995: Time frequency analysis of transient evoked otoacoustic emissions via smoothed pseudo-Wigner distribution. „Scand Audiol.” 24, 91-96.
- Dirckx J. J. J., Daemers K., Somers T. H., Offeciers F. E., Govaerts P. J., 1996: Numerical assessment of TEOAE screening results: currently used criteria and their effect on TEOAE prevalence figures. „Acta Otolaryngol.” (Stockh.) 116, 672-679.

- Grandori F., Ravazzani P., Tognola G., Hatzopoulos S., 1994: Some factors influencing the recording and the interpretation of otoacoustic emissions evoked at different click intensity levels. W: Advances in otoacoustic emission Vol 2, Eds. R. Thornton and F. Grandori, Karger, 48-64.
- Grzanka A., Hatzopoulos S., 1998: Przegląd metod czasowo-częstotliwościowych w odniesieniu do analiz sygnałów otoemisji akustycznych. „Audiofonologia” 13, 41-54.
- Hatzopoulos S., Cheng J., Grzanka A., Martini A., 1998 a: On the optimization of the TEOAE recording protocols. A linear protocol derived from parameters of a time-frequency analysis: A pilot study on neonatal subjects (accepted to „Scandinavian Audiology”).
- Hatzopoulos S., Prosser S., Mazzoli M., Rosignoli M., Martini A., 1998 b: On the Clinical Applicability of Transiently Evoked Otoacoustic Emissions (TEOAEs): The use of spectral discriminant functions in the identification and classification of hearing loss. „Audiol & Neurootol.” (to be published in 1998).
- Kemp D. T., Bray P. B., Alexander L., Brown A. M.: 1986: Acoustic emission cochleography-practical aspects. „Scand. Audiol. Suppl.” 25, 71-94.
- Maxon A. B., White K.R., Culpepper B., Vohr B. R., 1997: Maintaining acceptably low referral rates in TEOAE-based newborn hearing screening programs. „J. Commun. Disord.” 30, 457-475.
- Martini A., Hatzopoulos S., 1998: Value of OAEs for screening of hearing loss. International Conference of Pediatric ORL and Otology Update, 28-31 January 1998, Bangkok, Thailand.
- McNellis E. L., Klein A. J., 1997: Pass/fail rates for repeated click-evoked otoacoustic emission and auditory brainstem response screenings in newborns. „Otolaryngol. Head Neck Surg.” 116, 431-437.
- Qian S., Chen D., 1993: Discrete Gabor Transform. „IEEE Trans. Signal Processing” 41, 2429-2439.
- Qian S., Chen D., 1994: Decomposition of the Wigner-Ville distribution and time-frequency distribution series. „IEEE Trans. Signal Processing” 42, 2836-2841.
- Thornton A. R. D., 1993: High rate otoacoustic emissions. „J. Acoust. Am.” 94, 132-136.
- Welch D., Greville K. A., Thorne P.R., Purdy S.C., 1996: Influence of acquisition parameters on the measurement of click evoked otoacoustic emissions in neonates in a hospital environment. „Audiology” 35, 143-157.
- Welzl-Müller K., Stephan K., 1994: Confirmation of transiently evoked otoacoustic emissions based on user-independent criteria. „Audiology” 33, 28-36.
- White K. R., Vohr B. R., Behrens T. R., 1993: Universal newborn hearing screening using transient evoked otoacoustic emissions: Results of the Rhode Island hearing assessment project. „Semin. Hear” 14, 18-29.
- Whitehead M. L., Jimenez A. M., Stagner B. B., McCoy M. J., Lonsbury-Martin B. L., Martin G. K., 1995: Time-windowing of click-evoked-otoacoustic emissions to increase signal-to-noise-ratio. „Ear Hear” 16, 599-611.
- Wit H. P., Van Dijk, Avan P., 1994: On the shape of (evoked) otoacoustic emission spectra. „Ear Hear” 81, 208-214.