

Interdyscyplinarne ujęcie problemu szumów usznych i wynikające z niego technologie elektronicznego wspomagania diagnostyki i terapii

Interdisciplinary depiction of tinnitus problem and resulting techniques of diagnosis and therapy

Andrzej Czyżewski

Politechnika Gdańska
Instytutu Fizjologii i Patologii Słuchu, Warszawa

Streszczenie

Zaproponowano interpretację zjawiska powstawania szumów usznych w oparciu o teorię kwantowania sygnału fonicznego. Wskazano na realizowane aktualnie prace nad skonstruowaniem urządzenia opartego na generowaniu szumu maskującego typu dither, pracującego na częstotliwościach nadzłyszalnych (ultradźwiękowych). Urządzenie tego typu jest aktualnie projektowane w Politechnice Gdańskiej we współpracy z Instytutem Fizjologii i Patologii Słuchu.

Słowa kluczowe: szumy uszne, powstawanie szumu, maskowanie szumu, generatory ultradźwiękowe.

Summary

Tinnitus generating process explanation based on signal quantization theory was proposed. Current work was presented concerning an ultrasound tinnitus device employing dither noise as a masker. The device is engineered at the Gdansk University of Technology in a close co-operation with the Institute of Physiology and Pathology of Hearing.

Key words: tinnitus, noise generating, noise masking, ultrasound generators.

Wprowadzenie

Szumy uszne są określane jako postrzeganie dźwięków prostych przy braku zewnętrznych bodźców akustycznych. Uznaje się, że dolegliwość ta, która może dotyczyć nawet 15% populacji, nie jest chorobą, lecz stanowi objaw chorobowy, występujący najczęściej u osób w starszym wieku. Szumy uszne kwalifikuje się jako obiektywne lub subiektywne. Obiektywne szumy uszne powstają w przypadku: zaburzeń krążenia, np. w przypadku przepływu krwi przez zwężone naczynia tętnicze, przy skurczu mięśni ucha środkowego, [Boenninghaus 2002], w miokloniach mięśni podniebienia [Boenninghaus 2002], w patologii stawu żuchwo-skroniowego, w zaburzeniach drożności trąbki słuchowej [Becker (i in.) 1992]. Diagnostyka i terapia obiektywnych szumów usznych jest więc domeną specjalistów z zakresu medycyny. Subiektywne szumy uszne są percepcją fantomową sygnału neuronalnego i powstają na drodze całkowicie nieakustycznej, tzn. bez pobudzenia ślimaka. Subiektywne szumy uszne, w odróżnieniu od obiektywnych, są szczególnie intere-

sującym przedmiotem badań dla akustyków i specjalistów z dziedziny cyfrowego przetwarzania sygnałów.

Według definicji podanej przez Jastreboffa [2004] szumy uszne (*tinnitus*) występują na skutek nieprawidłowej aktywności nerwowej w obrębie drogi słuchowej, która nie jest wzbudzana przez jakąkolwiek kombinację dźwięków zewnętrznych. Jest to więc wspomniana wcześniej fantomowa percepcja sygnału neuronalnego dochodzącego z dróg słuchowych do kory słuchowej, tworzonego w procesach odmiennych od normalnego pobudzenia ucha i dróg słuchowych poprzez zewnętrzny dźwięk.

Najnowsze hipotezy powstawania szumów usznych starają się wyjaśnić to zjawisko w oparciu o nie zrównoważoną aktywność włókien aferentnych typu I i II, wpływ układu eferentnego, teorię kontroli bramkowania, współzależną aktywność spontaniczną włókien nerwu słuchowego, wpływ układu pozawstęgowego, wpływ układu współczulnego [Eggermont 2003; Goldstein (i in.) 2001; Heller 2003; Lenhardt (i in.) 2003; Skarżyński 2002].

Mechanizmy związane z generowaniem szumów usznych i próba ich interpretacji na gruncie interdyscyplinarnym

W większości przypadków pochodzenie szumów można wiązać z patologią ślimaka, tj. zaburzeniami motoryki komórek słuchowych zewnętrznych. Hipoteza ta związana jest ze wzrostem amplitudy skurczów szybkich komórek rzęsatych. Zaburzenia elektromechaniki powodują zaburzenia w obrębie kanałów jonowych, zaburzenia stężenia jonów wapniowych wewnątrz komórek słuchowych zewnętrznych oraz zaburzenia biochemiczne dotyczące biosyntezy białek. Inna hipoteza mówi o mechanizmie szumów usznych zapoczątkowanym niejednorodną degeneracją komórek słuchowych w uchu wewnętrznym. W przypadku zniszczenia komórek rzęsatych zewnętrznych na pewnym obszarze błony podstawnej i jednoczesnym występowaniu nienaruszonych komórek rzęsatych wewnętrznych, nie zrównoważona aktywność z tych dwóch populacji komórek jest odpowiedzialna za zapoczątkowanie serii procesów, które w końcowym wyniku prowadzą do percepcji szumów usznych. Jest to tzw. hipoteza dysharmonicznego zniszczenia zewnętrznych i wewnętrznych komórek rzęsatych [Becker (i in.) 1992; Eggermont 2003; Skarżyński 1998].

Szumy uszne często pojawiają się w sytuacji podniesienia progu słyszenia, związanego z ubytkiem słuchu, powodowanym przez choroby ucha wewnętrznego. Jak wynika z treści poprzedniego paragrafu, przyczyną tego stanu rzeczy może być degeneracja zewnętrznych komórek rzęsatych, która powoduje, że aktywacja neuronów ma miejsce dla sygnałów o wyższym poziomie, niż normalny. W sytuacji takiej mamy zatem do czynienia z pojawieniem się układu progowego o podwyższonym progu zadziałania. Zanim taki podwyższony próg pojawił się jednak u pacjenta, na przykład na skutek przebytej choroby albo rozwoju otosklerozy, na wyższych piętrach drogi słuchowej były odbierane sygnały interpretowane jako bodźce słuchowe. W związku z tym, dochodzi do wtrącenia dodatkowego mechanizmu kwantyzacji progowej słabych bodźców akustycznych, co jest powodowane podniesieniem progu aktywacji słuchowych komórek nerwowych. Istniejące w audiologii teorie, mające na celu wyjaśnienie tego zjawiska, nie uwzględniają bezpośrednio mechanizmów kwantyzacji sygnału, która ma miejsce w związku z istnieniem charakterystyki progowej w układzie transmisyjnym. Interpretacja taka staje się możliwa dopiero wówczas, jeżeli skorzysta się z wiedzy związanej z dziedziną przetwarzania sygnałów elektrycznych, rozwiniętej w innych dyscyplinach nauki, np. na gruncie cyfrowego przetwarzania sygnałów. W związku z tym, poniżej zostanie zaproponowana interpretacja zjawiska powstawania szumów usznych w oparciu o teorię kwantowania sygnału fonicznego. Ponadto, na gruncie cyfrowego przetwarzania sygnałów, wypracowano metody eliminacji szumu powstającego w procesie kwantyzacji progowej, zwaną techniką ditheringu. Technika ta, najogólniej ujmując, polega na dodawaniu do sygnałów użytecznych o niskim poziomie pewnej porcji szumu, co w efekcie zatrzymuje proces samorzutnej generacji szumu w torze, powodowany przez istnienie charakterystyki progowej. W tym kontekście łatwo można dostrzec, że w podobny sposób zwalczane są również szumy uszne w audiologii, tzn. stosuje się szum maskujący, który dostarczany jest przez specjalne urządzenia, zwane maskerami. Powszechnie znana skutecz-

ność tego rodzaju technik eliminacji zarówno szumów usznych, jak i szumów kwantyzacji, powstających samorzutnie w układach elektronicznych, wskazuje na zasadność interpretacji szumów usznych jako bezpośredniej konsekwencji kwantowania słabych sygnałów fonicznych w układach progowych. Zagadnienia te były przedmiotem analizy w monografii A. Czyżewskiego, B. Kostek i H. Skarżyńskiego [2002] pt. „Technika komputerowa w audiologii, foniatrii i logopedii”, wydanej przez Akademicką Oficynę Wydawniczą. Przeprowadzona analiza pozwoliła wykazać, w jaki sposób interpretacja zjawiska powstawania szumu w układach kwantujących oraz jego eliminacji za pomocą dodatkowego, „maskującego” szumu dither, może służyć wyjaśnieniu zjawisk obserwowanych w związku z szumami usznymi.

Typowe funkcje przejścia kwantyzera są określone zależnościami:

$$Q(x) = \Delta \left[\frac{x}{\Delta} + \frac{1}{2} \right] \quad (1)$$

lub:

$$f(x) = \Delta \left[\frac{x}{\Delta} \right] + \frac{\Delta}{2} \quad (2)$$

gdzie:

x – oznacza wartość próbki przed kwantyzacją (na wejściu),

Δ – wysokość schodka kwantyzacji,

$[]$ – jest operatorem, który zwraca najbliższą liczbę całkowitą w stosunku do danej liczby rzeczywistej.

W przypadku złożonych sygnałów wejściowych o dużych amplitudach sukcesywne błędy są nieskorelowane i dlatego widmo gęstości mocy błędu ma charakter podobny jak dla szumu białego. Sygnał błędu jest również nieskorelowany z sygnałem wejściowym. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa błędu dla kwantyzera o funkcji przejścia określonej wzorem (2) jest funkcją okna prostokątnego:

$$p_{\delta}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta} & \text{dla } |x| \leq \frac{\Delta}{2} \\ 0 & \text{dla } |x| > \frac{\Delta}{2} \end{cases} \quad (3)$$

Dla złożonych sygnałów wejściowych maksymalny błąd jest równy najmniej znaczącemu bitowi (LSB), a próbki błędu kwantyzacji n , przy dobrej aproksymacji, mogą być uważane za niezależne od sygnału wejściowego. Dla tego typu sygnałów wejściowych, jednorodna kwantyzacja może być w prosty sposób zamodelowana poprzez dodanie białego szumu do sygnału wejściowego. Jednak dla wejściowych sygnałów o niskim poziomie model addytywnego szumu białego przestaje obowiązywać. Wówczas błąd staje się w dużym stopniu zależny od sygnału wejściowego. Sygnałom z przedziału $(-\Delta/2, \Delta/2)$ konwerter przyporządkowuje wartość zero, przez co sygnały te nie zostają przeniesione przez tor (jest to tzw. „głuchota cyfrowa”). W takiej sytuacji na wyjściu nie otrzymuje się sygnału, a błąd równy jest sygnałowi wejściowemu, ale ma przeciwny znak. Ten typ błędu jest zauważalny słuchowo i dlatego jest niepożądanym zjawiskiem, towarzyszącym kwantyzacji.

Celem stosowania techniki dither jest modyfikacja statystycznych właściwości błędu całkowitego. W systemach kwantyzacji, w których nie jest stosowana technika dither, błąd chwilowy jest określoną funkcją sygnału wejściowego.

Jeśli sygnał wejściowy jest niezłożony i porównywalny w amplitudzie z wielkością kroku kwantyzacji, błąd jest silnie zależny od sygnału wejściowego i powoduje słyszalne zniekształcenia i szum modulacji. Użycie sygnału dither o odpowiednio ukształtowanych właściwościach statystycznych, może spowodować, że słyszalne zniekształcenia będą miały charakter podobny, jak stabilny szum biały.

We współczesnych cyfrowych torach fonicznych stosuje się technikę dither, wykorzystującą szum o trójkątnej funkcji gęstości prawdopodobieństwa i wartości międzyszczytowej 2 LSB. Szum dither jest zatem addytywnym szumem wprowadzonym do sygnału, najczęściej przed kwantyzatorem. Uśredniona odpowiedź uzyskiwana na wyjściu układu konwersji w funkcji sygnału wejściowego ma postać [Lipshitz (i in.) 1992]:

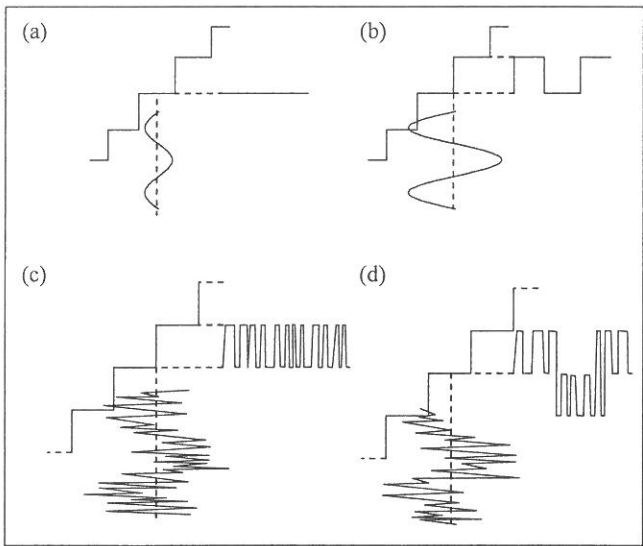
$$\bar{y}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} y(x+v) p_v(v) dv \quad (4)$$

gdzie: $p_v(v)$ jest gęstością rozkładu prawdopodobieństwa szumu określoną dla przypadku szumu o rozkładzie prostokątnym jako:

$$p_v(v) = \begin{cases} \xi, & \text{dla } |v| \leq \xi/2 \\ 0 & \end{cases} \quad (5)$$

gdzie: ξ – jest wartością międzyszczytową napięcia szumu dither.

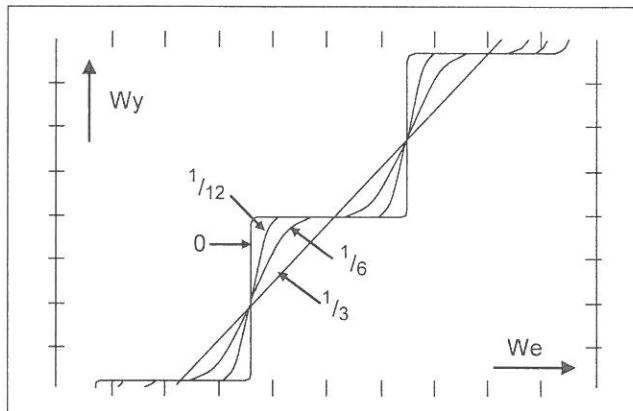
Na ryc. 1 zilustrowano podstawowe zjawiska, zachodzące w sytuacji, gdy na wejściu konwertera analogowo-cyfrowego znajduje się sygnał o amplitudzie porównywalnej z progiem kwantyzacji.



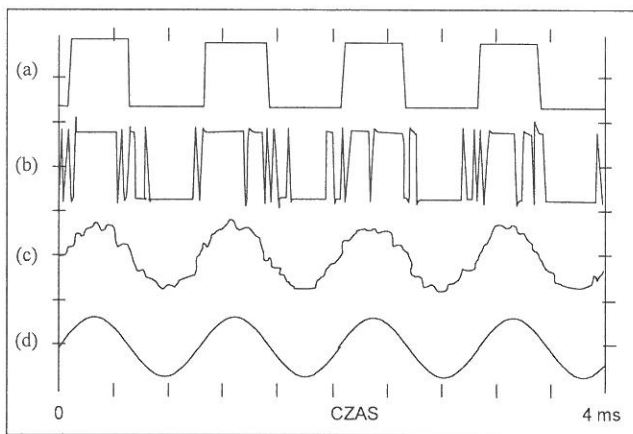
Ryc. 1. Efekty towarzyszące kwantowaniu małych amplitud i wpływ zastosowania szumu typu dither: (a) „głuchota cyfrowa”; (b) „kwantyzacja binarna”; (c) dither likwiduje zakres nieczułości konwertera; (d) „rozmycie odpowiedzi” w przypadku kwantyzacji binarnej

Obserwując wpływ szumu dither na kwantyzację w początkowym zakresie charakterystyki kwantyzera (patrz ryc. 2) można zauważyć, że jeśli w pewien sposób zwiąże się stałe obecny szum dither z charakterystyką kwantyzera, to przy odpowiednim doborze poziomu szumu jej stopnie („schodki”) ulegną rozmyciu i w pewien sposób zbliży się ona do charakterystyki prostoliniowej, przez co zmaleje błąd kwantyzacji i związany z nim szum.

Na ryc. 3a pokazano wynik kwantyzacji sygnału sinusoidalnego, otrzymany bez wprowadzania szumu dither, natomiast na ryc. 3b – wynik kwantyzacji tego samego sygnału w obecności szumu dither. Na tym samym rysunku (3 c i d) pokazano, że uśrednianie reprezentacji (b) może prowadzić do niemal doskonałego odtworzenia oryginalnego przebiegu, który był poddawany kwantyzacji. Należy przy tym zauważyć, że ponieważ słuch posiada wyraźnie dostrzegalne własności całkujące, podobne procesy z całą pewnością mogą także zachodzić w torze słuchowym.



Ryc. 2. Efekt linearyzacji charakterystyki konwersji pod wpływem szumu dither o różnych poziomach, odpowiadających ułamkom wartości skoku kwantyzacji



Ryc. 3. Efekty kwantyzacji przebiegu o amplitudzie odpowiadającej progowi kwantyzacji: (a) sygnał harmoniczny bezpośrednio po kwantyzacji; (b) kwantyzacja z wykorzystaniem szumu dither; (c) sygnał z poprzedniego rysunku uśredniany w czasie 32-ch okresów; (d) wynik uśredniania w czasie 960 okresów

Na ryc. 4 pokazano, w jaki sposób dodanie szumu dither wpływa na redukcję zniekształceń harmoniczných.

Moc szumu na wyjściu przy statycznym sygnale wejściowym można określić jako:

$$P_n^2(x) = \int_{-\infty}^{\infty} [y(x+v) - \bar{y}(x)]^2 p_v(v) dv \quad (6)$$

W przypadku szumu dither o rozkładzie Gaussowskim, określonym jako:

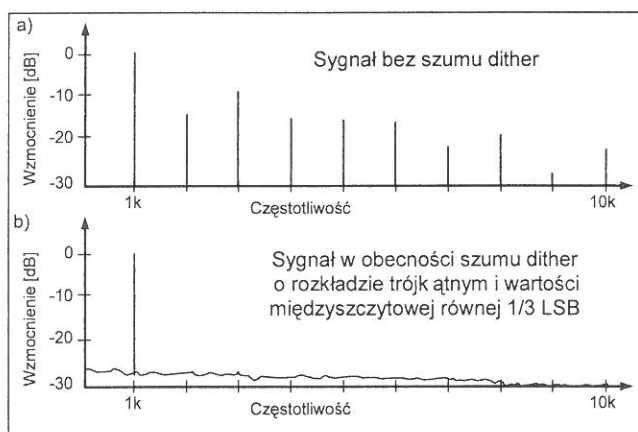
$$p_v(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v} \exp\left(-\frac{v^2}{2\sigma_v^2}\right) \quad (7)$$

$$\bar{v} = \sum_k v_k p_v[v_k] \quad (8)$$

$$\sigma_v^2 = \sum_k (v_k - \bar{v})^2 p_v[v_k] \quad (9)$$

praktycznie nie występuje modulacja szumem. Dodanie szumu Gaussowskiego wpływa na ograniczenie błędów kwantyzacji, będąc jednocześnie stosunkowo prostym w realizacji technicznej.

Wprowadzenie „maskującego” szumu dither pozwala na uzyskanie pożądanych efektów związanych z eliminacją zakresu nieczułości kwantyzera i minimalizacją zniekształceń, które występują dla bardzo małych amplitud sygnału poddawane kwantyzacji. Słyszalność wprowadzonego szumu może być zmniejszona na drodze wstępnego ukształtowania jego widma w taki sposób, aby energia szumu rosła w zakresie wysokich częstotliwości. Te same zasady przyświecają maskowaniu szumów usznych, co wskazuje na bezpośrednie podobieństwo zjawisk zachodzących w elektronicznych i w biologicznych układach transmisji sygnałów.



Ryc. 4. Widmo skwantowanego sygnału harmonicznego o amplitudzie odpowiadającej progowi kwantyzacji (a) oraz widmo tego samego sygnału w obecności szumu dither, który dodano na wejściu konwertera a/c (b)

Metody redukowania szumów usznych na drodze elektronicznej

Problem szumów usznych i nadwrażliwości na dźwięki oraz metody mające na celu poprawę sytuacji pacjentów cierpiących na te zaburzenia znane są z bogatej literatury i opisów patentowych. Ogólnie mówiąc, metoda taka polega na doprowadzeniu szumu zewnętrznego do ucha dotkniętego szumem w celu zamaskowania szumu wewnętrznego lub poddania pacjentów habituacji (przyzwyczajaniu) do szumu odbieranego przez nich subiektywnie. Zagadnienia te znajdują obszerne odbicie w literaturze. Ponadto, rozwiązania techniczne urządzeń do zwalczania szumów usznych można w sposób efektywny prześledzić na podstawie patentów nadanych w tej dziedzinie.

Najwcześniejszy patent amerykański nr 4,034,741 pochodzi z roku 1977 i dotyczy generatora szumów i nadajnika z zastosowaniem obwodu, który może być przełączany w celu uzyskiwania zmiennego kształtu fali z aktywnego źródła szumu pochodzącego ze zintegrowanego wzmacniacza obwodowego. Wynalazek ten przedstawia urządzenie uspra-

wniające wcześniej wymienione zastosowanie przy wspomaganiu wywołania naturalnego snu. Proponowane rozwiązanie jest przestarzałe technologicznie. Nowsze rozwiązanie maskera szumów usznych opisane jest w patencie amerykańskim nr 4,222,393, zgodnie z którym pacjent cierpiący na szumy poddawany jest działaniu dźwięków zewnętrznych o różnej wysokości, jeden po drugim. W ten sposób pacjent może zidentyfikować poszczególne dźwięki zewnętrzne, których wysokość jest taka sama jak dźwięk szumów usznych odbieranych wewnątrz przez pacjenta. Następnie, pacjent otrzymuje generator szumów, wytwarzający zakres częstotliwości powyżej i poniżej wcześniej wymienionej wysokości, aby w ten sposób zamaskować dźwięk szumów usznych. Generator dźwięków może być noszony tak samo jak aparat słuchowy, a jeżeli istnieje taka potrzeba może też być połączony z aparatem słuchowym. Energia pierwotna generatora dźwięków wytwarzana jest w zakresie częstotliwości od 1000 Hz, 5000 Hz i 10000 Hz. Niektóre z rozwiązań tego patentu wydają się uzasadnione, jak na przykład koncepcja dopasowywania kształtu widma dźwięku maskującego do potrzeb pacjenta. Natomiast opisane rozwiązanie elektroniczne, głównie opierające się na elementach dyskretnych jest technologicznie przestarzałe.

Urządzenie maskujące szumy uszne jest również opisane w patencie europejskim nr 449 860 B1. Składa się ono z obwodu elektronicznego do generowania widma dźwięku, które może maskować szumy uszne odczuwane przez pacjenta. Jest ono tak zaprojektowane, aby widmo generowane przez odbiornik zawierało widmo liniowe tonu podstawowego, przy czym pacjent sam może dopasowywać częstotliwość dźwięku podstawowego. Rozwiązanie proponowane w tym patencie jest zbyt uproszczone i jako takie nie może być uważane za urządzenie uniwersalne i dostosowane do potrzeb pacjentów cierpiących na szumy uszne.

Stosunkowo niedawno złożony patent amerykański nr 5,403,262 opisuje urządzenie maskujące szumy uszne oraz metodę wytwarzania sygnału maskującego z podaną wybraną częstotliwością środkową, wybraną szerokością pasma i głośnością. Zastosowano tu losowy generator szumów oraz obwód zegarowy w połączeniu z zespołem filtrów o przełączanej pojemności w celu wytwarzania sygnału maskującego o wybranej częstotliwości środkowej i wybranej szerokości pasma. Sygnał maskujący jest odbierany przez zestaw do regulacji głośności, a następnie wzmacniany i doprowadzany do ucha lub uszu pacjenta poprzez głośniki lub słuchawki. Opisany system nie nadaje się do prowadzenia diagnostyki szumów usznych.

Kolejny amerykański wniosek patentowy obejmujący omawiany problem techniczny to patent nr 5,788,656 dotyczący systemu stymulacji elektronicznej do leczenia pacjentów cierpiących na zaburzenia szumów usznych polegające na tym, że pacjent słyszy dzwonienie lub inne dźwięki powstające w jego uchu. W skład systemu wchodzi elektronicznie pobudzana sonda, do której podawany jest złożony sygnał w widmie słyszalnym. Powoduje to wibracje sondy zgodnie z doprowadzonym sygnałem. Sondę umieszcza się u pacjenta w miejscu znajdującym się blisko ucha wewnętrznego. Wibracje sondy są stamtąd przenoszone do ślimaka, pobudzając ten organ i w ten sposób łagodząc zaburzenia powodowane przez szumy uszne. W systemie tym korzysta się z dwóch nastawnych oscylatorów częstotliwości akusty-

cznej, z których jeden działa w zakresie niskich częstotliwości, którego górna granica wynosi około 400 Hz, a drugi działa w zakresie wysokich częstotliwości o górnej granicy około 1000 Hz. Wyjścia tych oscylatorów są połączone i wzmacniane w celu wytworzenia złożonego sygnału przekazywanego do sondy. Wibracje mechaniczne przekazywane przez sondę zgodnie ze złożonym sygnałem muszą być odpowiednio powiązane z częstotliwościami dźwięków szumów usznych słyszanych przez pacjenta. Patent ten różni się od wcześniejszych patentów sposobem przekazywania sygnałów akustycznych do uszu pacjenta w oparciu o wspomniane sondy wibracyjne. Podobnie jest w przypadku aparatu słuchowego z wibracyjnym napędem bezpośrednim opisanym w amerykańskim patencie nr 5,795,287. Stymuluje on słuch poprzez wprowadzanie w wibracje obiektu, z którym jest sprzężony. Użytkownik może dokonać wyboru częstotliwości, natężenia i fazy generowanego dźwięku. Ponadto, można też wybrać drugi ton lub dźwięk w tle. Kolejne urządzenie wibrujące do diagnozowania i leczenia zaburzeń słuchu posiadające naddźwiękowy przetwornik o częstotliwości rezonansowej w zakresie naddźwiękowym jest opisane w amerykańskim wniosku patentowym nr 6,068,590.

Patent europejski nr 9611047 dotyczący problemu szumów usznych ma datę wcześniejszą, czyli rok 1996, natomiast jego amerykańska wersja jest z kwietnia 2000 roku i ma numer 6,047,074. Opisany jest tam programowalny aparat słuchowy, możliwy do stosowania w trybie odpowiednim do terapii szumów usznych w połączeniu z korygowaniem innych zaburzeń słuchu, na jakie cierpi użytkownik aparatu słuchowego. Tor przetwarzania sygnałów posiada również rozwiązanie umożliwiające wytwarzanie sygnału stosowanego do terapii szumów usznych. Sygnał ten jest łączony w torze przetwarzania sygnałów z sygnałem użytecznym, zależnie od wybranego lub nastawionego trybu działania. Opisany patent nie określa sposobów dokonywania skoordynowanej diagnozy szumów usznych, ani nie podaje informacji na temat dźwięków maskujących dostarczanych z zewnątrz. Ponadto pomija problem dopasowywania dźwięków maskujących do potrzeb pacjenta, nie podaje też żadnych informacji o sposobie dokonywania zapisu, kształtowania i transmisji sygnałów zewnętrznych do aparatu słuchowego, który ma działać jako urządzenie maskujące szumy uszne.

Analiza dostępnej literatury i wzmiankowanych powyżej opracowań patentowych prowadzi do wniosku, że analogia pomiędzy zjawiskami towarzyszącymi powstawaniu subiektywnych szumów usznych i działaniem toru akustycznego z filtracją progową nie jest do końca uświadamiana przez twórców rozwiązań urządzeń elektronicznych do terapii szumów usznych. Z tego względu opracowano propozycje własnych rozwiązań w tym zakresie, z których niektóre, odnoszące się zarówno do metod diagnostycznych, jak i terapeutycznych zostaną przedstawione w dalszej części niniejszego artykułu.

Opracowywane rozwiązania

Rozwiązania opracowane w ramach współpracy Politechniki Gdańskiej z warszawskim Instytutem Fizjologii i Patologii Słuchu odnoszą się do sposobu tworzenia nowego rodzaju interaktywnych usług informacyjnych, diagnostycznych i rehabilitacyjnych dla osób cierpiących na szumy uszne oraz

na nadwrażliwość na dźwięki, które to usługi wykorzystują współczesne możliwości techniki komputerowej i telekomunikacji. W szczególności multimedialne oprogramowanie komputerowe działające według opracowanej koncepcji, które może być instalowane lokalnie lub udostępniane poprzez sieć komputerową, umożliwia prowadzenie badań przesiewowych w zakresie szumów usznych oraz dzięki specjalnej metodzie dopasowania dźwięków maskujących do potrzeb pacjenta umożliwia prowadzenie rehabilitacji osób cierpiących na szumy uszne metodą maskowania albo habituacji. Możliwą do zrealizowania w stosunkowo łatwy sposób funkcją takiego systemu jest ponadto dostarczanie kierowanej informacji pacjentom cierpiącym na szumy uszne. Druga grupa opracowań dotyczy rozwiązań zminiaturyzowanych maskerów szumów usznych, których zasada działania oparta jest na interpretacji mechanizmów powstawania szumów usznych, opisanej wyżej.

Istotą opracowanego systemu diagnostycznego jest automatyczne badanie, oparte na wykorzystaniu odpowiedniej ankiety komputerowej (patrz portal Internetowy: www.telezdrowie.pl) oraz na zaprezentowaniu za pomocą multimedialnego komputera osobie badanej zestawu dźwięków, które przypominają swym brzmieniem typowe szumy odczuwane subiektywnie przez pacjentów. Zadaniem badanego jest udzielenie odpowiedzi na szczegółowe pytania zawarte w ankiecie elektronicznej a następnie wskazanie dźwięków, które w najwyższym stopniu przypominają odczuwane przez niego szumy uszne. Na podstawie algorytmicznej analizy wyników ankiety oraz analizy wyboru dźwięków dokonanej przez pacjenta komputer kwalifikuje badaną osobę jako wolną od szumów usznych lub zalicza ją do jednej z grup ryzyka. Następnie osoba badana jest informowana o wyniku badania i może zapoznać się ze skierowaną do niej informacją na temat przyczyn występującej dolegliwości i zalecanego sposobu jej leczenia. Na tym etapie wskazany jest także kontakt ze specjalistą, który może być osobisty albo organizowany za pomocą dostępnych w systemie komputerowym środków do prowadzenia telekonferencji. Aby ułatwić dalszy kontakt z lekarzami, system w chwili postawienia diagnozy może nadać pacjentowi osobisty numer identyfikacyjny. Z opisanym powyżej narzędziem diagnostycznym sprzężone jest ponadto narzędzie rehabilitacyjne w postaci programowalnego maskera szumów usznych. W celu skorzystania z niego pacjent może wypróbować różne dźwięki maskujące odtwarzane przez system za pośrednictwem karty dźwiękowej i dołączonych do niej słuchawek, a następnie załadować wybrane dźwięki do zminiaturyzowanego osobistego odtwarzacza cyfrowego w celu ich stosowania w dalszej terapii. W ten sposób opracowany system wykorzystuje współczesny komputer multimedialny do celu skutecznego informowania o problemie szumów usznych oraz do celu prowadzenia badań diagnostycznych w tej dziedzinie a także organizowania terapii opartej na zoptymalizowanym maskowaniu szumów usznych różnego typu doprowadzanym z zewnątrz filtrowanym szumem lub dźwiękami syntetycznymi, lub dźwiękami naturalnymi. Widma niektórych dźwięków wybranych do stosowania w terapii przedstawiono na ryc. 5.

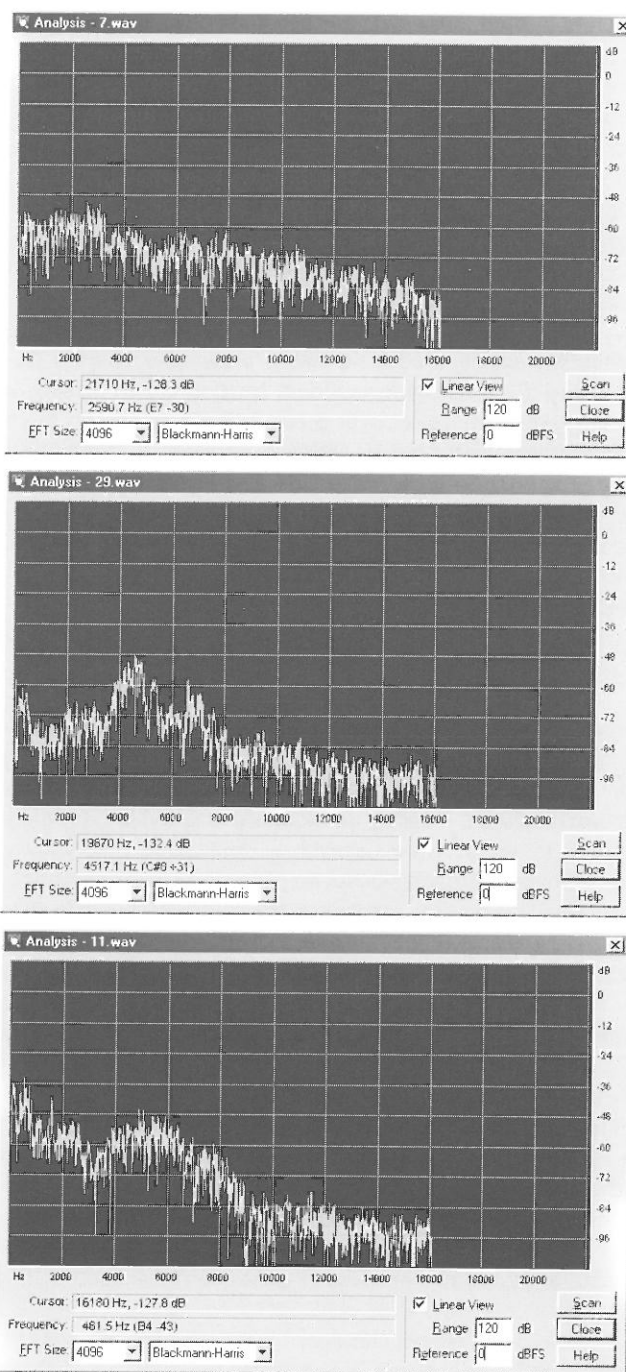
Opracowany system może być stosowany w formie oprogramowania komputerowego na typowych osobistych komputerach multimedialnych, które są wyposażone w kartę

dźwiękową wraz z dołączonymi do niej słuchawkami oraz w port komunikacyjny umożliwiający przesyłanie próbek dźwiękowych do zminiaturyzowanych odtwarzaczy cyfrowych. Oprogramowanie do prowadzenia diagnostyki i rehabilitacji szumów usznych może być instalowane lokalnie lub na odległym serwerze sieciowym, z którym komunikuje się komputer użytkownika systemu.

Ankieta elektroniczna zastosowana w systemie diagnostyczno-rehabilitacyjnym zawiera 30 pytań opracowanych przez specjalistów z Instytutu Fizjologii i Patologii Słuchu, które dotyczą: wyników badania słuchu, uwarunkowań genetycznych, historii chorób słuchu, zawrotów głowy, charakteru, nasilenia, czasu trwania i częstotliwości odczuwanych szumów usznych, narażeń na hałas w życiu codziennym, spożywanych używek, nadciśnienia tętniczego i innych. Materiał dźwiękowy wykorzystywany do porównawczego badania charakteru szumów usznych odczuwanych subiektywnie przez pacjenta obejmuje pliki dźwiękowe, poddane kompresji, które zawierają szum dither o prostokątnym i trójkątnym rozkładzie gęstości widmowej mocy, tony proste o różnych częstotliwościach, wielotony zarówno harmoniczne, jak i nieharmoniczne oraz różnego typu dźwięki syntetyczne i naturalne. Liczba dźwięków udostępnianych badanej osobie do celu porównania ich z wewnętrznym odczuwanym szumem usznym wynosi 16, jednak jako najważniejsze traktowane są szumy typu dither. Jak już wspomniano, na podstawie algorytmicznej analizy wyników ankiety oraz analizy wyboru dźwięków dokonanej przez pacjenta, komputer kwalifikuje badaną osobę jako wolną od szumów usznych lub zalicza ją do jednej z grup ryzyka. Zastosowany algorytm decyzyjny opiera się na wiedzy eksperckiej z dziedziny diagnostyki szumów usznych i ma charakter deterministyczny. Wykorzystuje on wagi skalujące odpowiedzi na poszczególne pytania, tak aby suma punktów zgromadzonych przez pacjenta odzwierciedlała w możliwie najlepszym stopniu stopień zagrożenia dolegliwością.

Dźwięki z zakresu pasma fonicznego wybrane przez pacjenta (po dodatkowej konsultacji ze specjalistą) do stosowania w życiu codziennym jako maskery, albo do wykorzystania w terapii opartej na metodzie habituacji, mogą być w opracowanym systemie „Tinnitus” załadowane z komputera do cyfrowego odtwarzacza plików dźwiękowych, wyposażonego w miniaturowe słuchawki. Należy przy tym zwrócić uwagę, że pacjenci skarżący się na szumy uszne nie powinni mieć zatykanych otworów usznych, w związku z tym należy stosować słuchawki otwarte. Podstawową zaletą takiego rozwiązania sposobu wytwarzania dźwięków jest możliwość bezpośredniego użycia pobranych dźwięków, które mogą być zakodowane w formacie mp3. Odtwarzacz cyfrowy, który jest oparty na aktualnej technologii jest niewielki, lekki, zasilany bateryjnie, nie posiada ruchomych mechanicznych elementów napędu nośnika, czyli jest bardzo dobrym przenośnym narzędziem do odtwarzania dobranego maskera szumów usznych (ryc. 6).

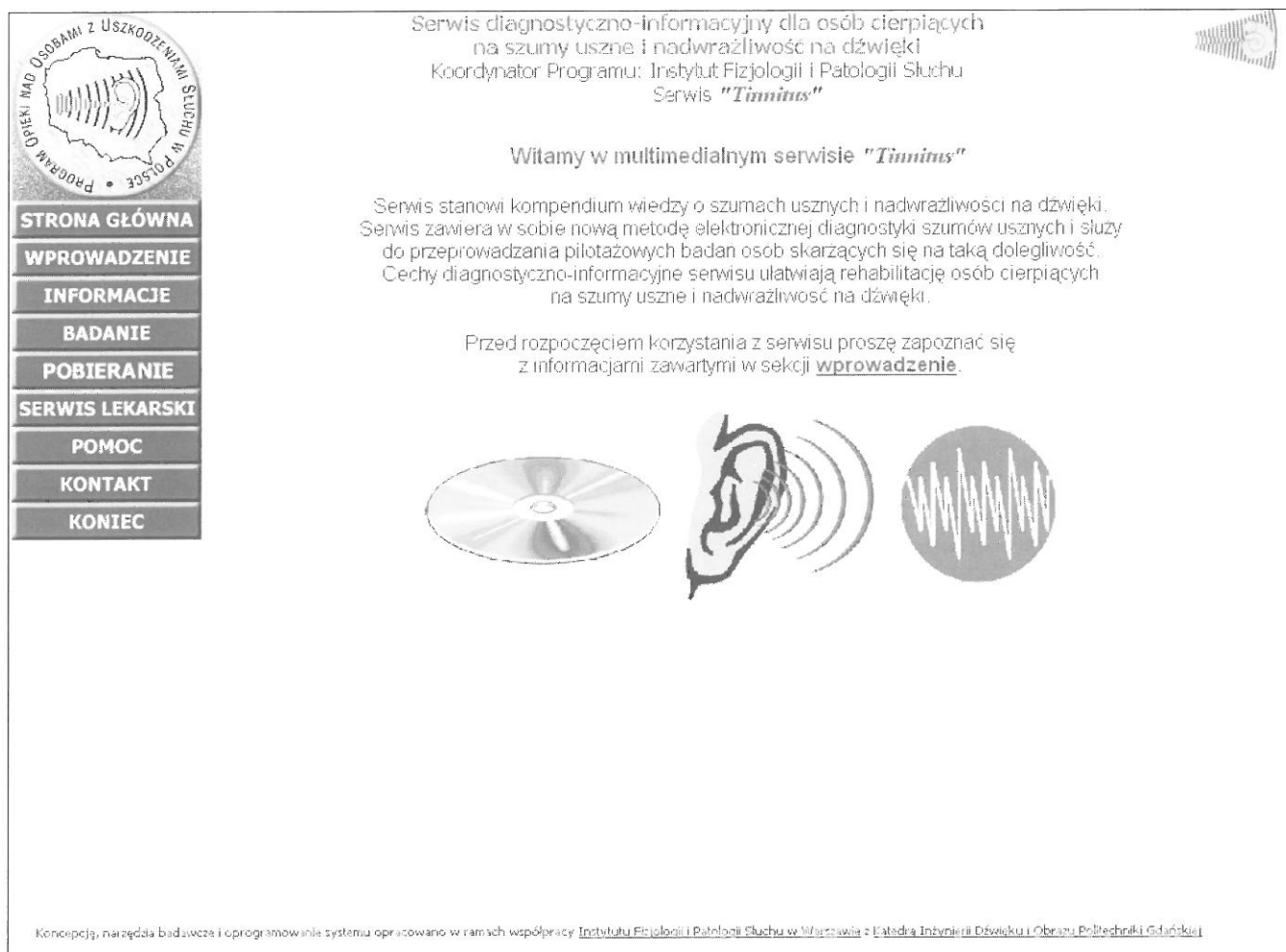
Na podstawie opisanych rozwiązań koncepcyjnych dokonano implementacji w językach html i JAVA Powszechnego Systemu Diagnostyczno-Rehabilitacyjnego dla Osób Cierpiących na Szumy Uszne i Nadwrażliwość na Dźwięki „Tinnitus” w formie aplikacji Internetowej (adres: www.telezdrowie.pl) oraz w postaci płyty CD-ROM, umożliwiającej lokalną instalację oprogramowania. Opracowany system zo-



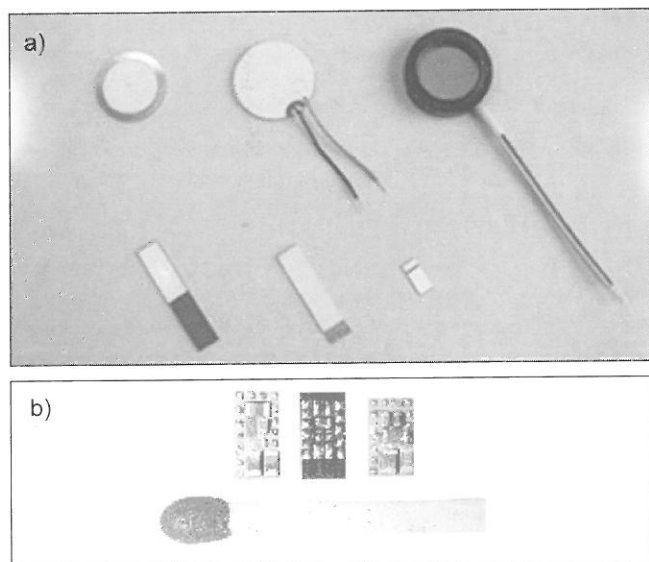
Ryc. 5. Widma wybranych dźwięków przeznaczonych do terapii szumów usznych: a/ szum morza; b/ ćwierkanie ptaków c/ wiatr arktyczny



Ryc. 6. Odtwarzacz plików dźwiękowych wbudowany w zegarek elektroniczny



Ryc. 7. Główny interfejs użytkownika systemu „Tinnitus”



Ryc. 8. Przetworniki piezoelektryczne, stanowiące podstawę konstrukcji ultradźwiękowego pobudnika kostnego – maskera szumów usznych (a) oraz subminiaturowe procesory sygnałowe, używane do generowania szumu typu dither na częstotliwościach rzędu 30 kHz (b)

stał poddany badaniom pilotażowym przeprowadzonym przez Klinikę Szumów Usznych Instytutu Fizjologii i Patologii Słuchu w Warszawie. Stronę główną aplikacji udostępnionej w sieci Internet przedstawiono na ryc. 7.

Aktualnie w Politechnice Gdańskiej we współpracy z Instytutem Fizjologii i Patologii Słuchu trwają prace nad konstruowaniem urządzenia opartego na generowaniu szumu maskującego typu dither, pracującego na częstotliwościach ponadслыszalnych (ultradźwiękowych). Zastosowanie przetwornika ultradźwiękowego (patrz ryc. 8) pozwala na uzyskanie korzystnych właściwości maskera, ponieważ:

- 1) możliwe staje się wykorzystanie przewodnictwa kostnego do transmisji szumu maskującego [Cai (i in.) 2002],
- 2) można zwiększać poziomy tego szumu bez powodowania jego słyszalności zmęczenia słuchu,
- 3) przetwornik ultradźwiękowy o małych wymiarach umożliwia daleko idącą miniaturyzację urządzenia.

Bibliografia

- Becker W., Naumann H., Pfaltz C. [1992]. Choroby uszu, nosa i gardła. Warszawa: Bel Corp Scientific Publ.
- Boenninghaus H. G. [2002]. Zarys otolaryngologii. Warszawa: Springer-PWN.
- Cai Z., Richards D., Lenhardt M., Madsen A. [2002]. Response of human skull to bone conducted sound in the audiometric to ultrasonic range. „The International Tinnitus Journal” 8, 1-8.
- Czyżewski A., Kostek B., Skarżyński H. [2002]. Technika komputerowa w audiologii, foniatrii i logopedii. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT.
- Eggermont J. [2003]. Central Tinnitus, Auris, Nasus. „Larynx” 30, 7-12, 2003.
- Eggermont J. [2004]. The neuroscience of tinnitus. „Trends in Neurosciences” 27(11).
- Goldstein B., Shulman A., Lenhardt M. L., Richards D. G., Madsen A. G., Gupta R. [2001]. Long-term Inhibition of Tinnitus by Ultra-Quiet™ Therapy – Preliminary Report. „International Tinnitus Journal” 7(1-2), 122-127.
- Hakansson B., Tjellstrom A., Rosenhall U. [1985]. Acceleration levels at hearing threshold with direct bone conduction vs. conventional bone conduction. „Acta Otolaryngologica” 240-252.
- Heller A. J. [2003]. Classification and epidemiology of tinnitus. „Otolaryngologic Clinics of North America” 36, 239-248.
- Iwaszkiewicz J. [1967]. Zarys otolaryngologii. Warszawa: PZWL.
- Lenhardt M. [2003]. Ultrasonic Hearing in Humans: Applications for Tinnitus Treatment. „The International Tinnitus Journal” 9(1-2), 69-76.
- Lipshitz S. P., Wannamaker R. A., Vanderkooy J. [1992]. Quantization and Dither: A Theoretical Survey. „Journal of the Audio Engineering Society” 40 (5), 355-375.
- Nishimura T., Nakagawa S., Sakaguchi T., Hosoi H. [2003]. Ultrasonic masker clarifies ultrasonic perception in man. „Hearing Research” 175, 171-177.
- Pawlas K. [1995]. Audiometria w paśmie powyżej 8kHz w profilaktyce uszkodzeń słuchu powodowanych przez hałas impulsowy. Sosnowiec: Instytut Medycyny Pracy i Zdrowia Środowiskowego.
- Sahley T., Nodar R. [2001]. A biochemical model of peripheral tinnitus. „Hearing Research” 152, 43-54.
- Skarżyński H. (red.). [1998]. Szumy uszne i nadwrażliwość na dźwięki. Warszawa: IFPS.
- Skarżyński H. [2002]. Szumy uszne w życiu codziennym – Porady praktyczne dla pacjentów. Warszawa: IFPS.

Publikacje internetowe

- American Tinnitus Association. [2004]. www.ata.org.
- Bartnik G., Borawska B. [2004]. Program terapii szumów usznych metodą Tinnitus Retraining Therapy (TRT), materiał szkoleniowy IFiPS. <http://www.ifps.org.pl/Plyty/bartnik.html>.
- Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu. [2004]. www.ifps.org.pl.
- Jastreboff P. [2004]. Tinnitus Home Page. <http://www.tinnitus-pji.com>.

Adres do korespondencji

Andrzej Czyżewski
 Politechnika Gdanska
 Katedra Systemów Multimedialnych
 ul. Narutowicza 11/12
 80-952 Gdansk
 e-mail: ac@pg.gda.pl