

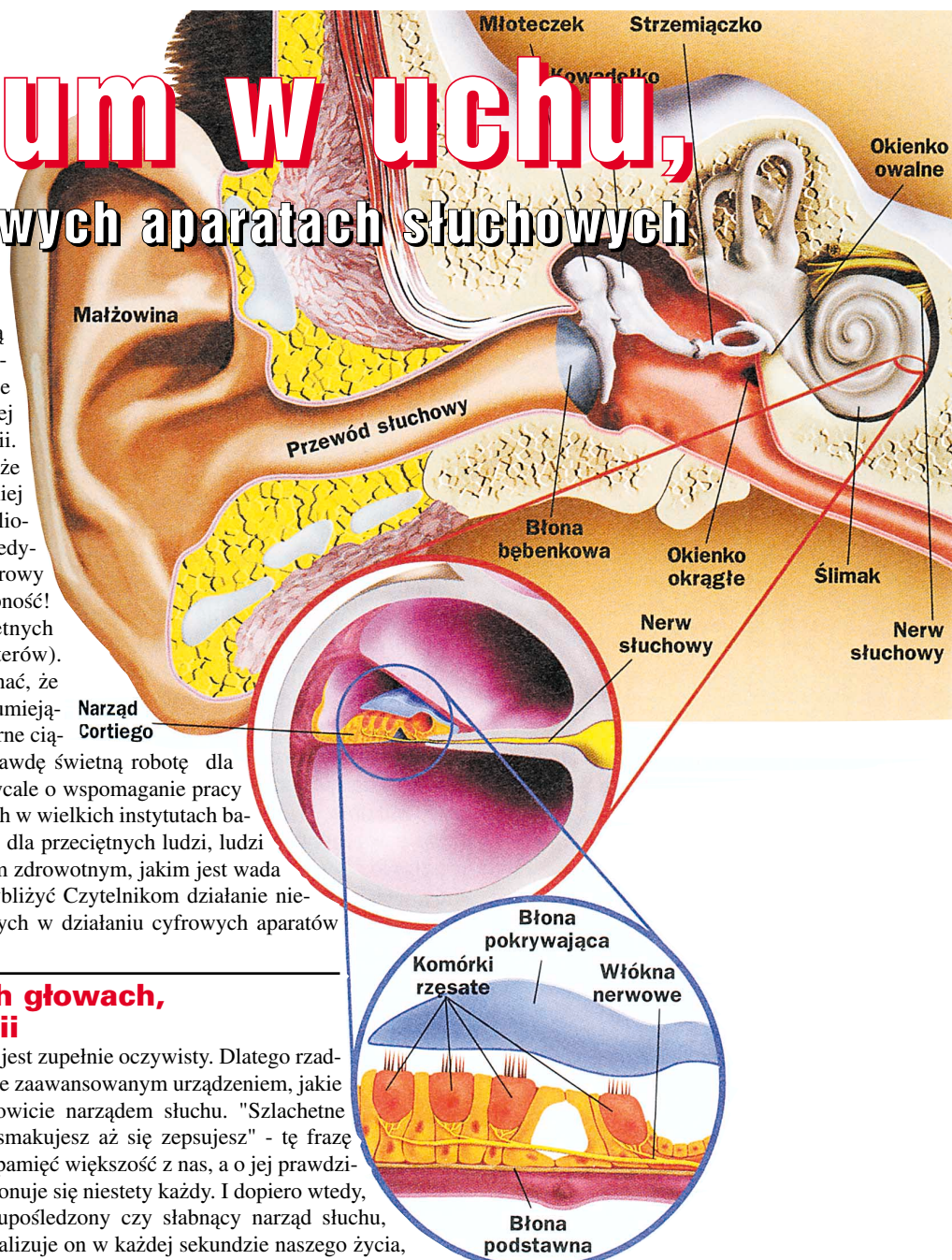
To warto wiedzieć

Pentium w uchu, czyli o cyfrowych aparatach słuchowych

Uważni Czytelnicy EdW pamiętają być może pewien chłód emocjonalny towarzyszący omawianiu przeze mnie ekspansji techniki cyfrowej w artykule poświęconym fotografii. Ale nie myślę się chyba, twierdząc, że trudno znaleźć kogoś, komu mocniej zabiłoby serce na widok setek milionów następujących po sobie zer i jedynek składających się na zapis cyfrowy dźwięku czy obrazu. Brr! Okropność! To prawdziwy bełkot beznamiennych szarych pudeł (czytaj: komputerów). Trzeba jednak obiektywnie przyznać, że odpowiednio użyte procesory, rozumiejące i umiejące przetwarzać koszmarnie ciągi bitów, mogą wykonywać naprawdę świetną robotę dla dobra człowieka. I nie chodzi tu wcale o wspomaganie pracy wybitnych naukowców pracujących w wielkich instytutach badawczych, ale o codzienną pomoc dla przeciętnych ludzi, ludzi dotkniętych poważnym problemem zdrowotnym, jakim jest wada słuchu. Chciałbym więc dziś przybliżyć Czytelnikom działanie niepozornych z wyglądu, ale potężnych w działaniu cyfrowych aparatów słuchowych.

High-tech w naszych głowach, czyli trochę anatomii

Dla zdrowych ludzi fakt, że słyszą jest zupełnie oczywisty. Dlatego rzadko zastanawiamy się nad niezwykle zaawansowanym urządzeniem, jakie mamy w swoich głowach, mianowicie narządem słuchu. "Szlachetne zdrowie nikt się nie dowie jako smakujesz aż się zepsujesz" - tę frazę z fraszki Kochanowskiego zna na pamięć większość z nas, a o jej prawdziwości wcześniej czy później przekonuje się niestety każdy. I dopiero wtedy, gdy staramy się wspomóc nasz upośledzony czy słabnący narząd słuchu, stwierdzamy jak trudne zadania realizuje on w każdej sekundzie naszego życia, a precyzyjna i przemyślana konstrukcja wywołuje zachwyt inżynierów. Nasze

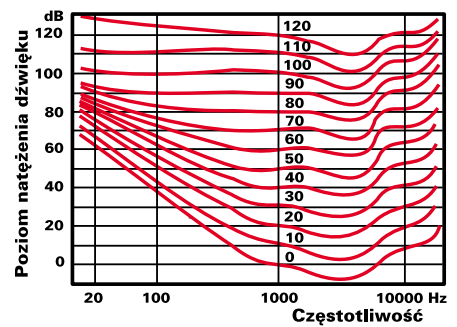


uszy zapewniają nam nieprzerwaną komunikację z otaczającym nas światem. Odbierają i analizują sygnały dźwiękowe, a po przetworzeniu wysyłają je do mózgu. Wszystko to dzieje się w zamkniętej przestrzeni zajmującej około 16 cm sześciennych dzięki wykorzystaniu zasad akustyki, mechaniki, hydrodynamiki, elektroniki i matematyki wyższej. Żeby zorientować się, przed jakimi wyzwaniami stają konstruktorzy nowoczesnych aparatów słuchowych, zastanówmy się przez chwilę nad tym, czego potrafi dokonać sprawny narząd słuchu. Będą nam do tego potrzebne podstawowe pojęcia stosowane w akustyce. Dźwięk to zachodzące z odpowiednią częstotliwością zmiany ciśnienia w ośrodku sprężystym np. powietrzu, które odkształcając błonę bębenkową naszych uszu. Drgania te przenoszą się na niezwykle precyzyjny mechanizm, jakim jest ucho środkowe. To układ trzech najmniejszych w naszym organizmie kosteczek: młoteczka, kowadełka i strzemiączka - nazwanych tak ze względu na kształt, stanowiących pomost między błoną bębenkową a uchem wewnętrznym. Zamienia on drgania akustyczne na mechaniczne, a dzięki odpowiedniemu "przełożeniu" zwiększa ich amplitudę prawie 30-krotnie. Wszystko to umożliwia działanie następnej części narządu słuchu, jakim jest ucho środkowe. Tu, oprócz skomplikowanego układu równowagi, którym nie będziemy się zajmować, znajduje się tak zwany ślimak, czyli trzy rozszerzające się rurki wypełnione płynem i zwinięte spiralnie na kształt muszli. Przechodzące z ucha środkowego drgania przedostają się przez "okienko owalne" do ślimaka i wywołują zmiany ciśnienia w wypełniającym go płynie. Zmiany te rozchodzą się falowo od szczytu ślimaka i z powrotem. Wzdłuż jednej ze ścian ślimaka mieści się bardzo czuły narząd zwany aparatem Cortiego, którego zasadniczą część stanowi około 15000 komórek rzęsatych ułożonych rzędami. Od komórek tych odchodzą tysiące włókien nerwowych przekazujących, w formie impulsów elektrochemicznych, dane o częstotliwości, natężeniu i barwie odbieranych dźwięków do mózgu, gdzie powstają wrażenia słuchowe. Nasz narząd słuchu dokonuje też w zdumiewający, a nie poznany jeszcze do końca sposób, fourierowskiej analizy docierającego doń sygnału na tony harmoniczne. Dzięki temu potrafimy odróżnić brzmienie trąbki od dźwięku skrzypiec, choć obydwa instrumenty mogą wydawać z siebie ton o tej samej częstotliwości, bez trudu rozpoznajemy też głos znajomego przez telefon. Mówiąc o możliwościach naszego słuchu, trzeba wspomnieć o jego nadzwyczajnej dynamice. Słyszymy zarówno cichutki szept, jak i 10 bilionów razy głośniejszy huk startującego odrzutowca. Olbrzymia rozpiętość wartości natężeń dźwięku z jakimi spotykamy się na co dzień uniemożliwia stosowanie

skali liniowej dla porównywania głośności różnych dźwięków. Ponadto, zgodnie z prawem Webera-Fechnera, odczuwane wrażenie słuchowe jest w przybliżeniu proporcjonalne do logarytmu wywołującej je podniety (dzięki takiej charakterystyce ucha głośne dźwięki nie zamieniają naszego życia w koszmar). W związku z tym wprowadzono w akustyce względną miarę natężenia dźwięku wyrażoną w decybelach i określona wzorem:

$$i = 10 \log i / i_0 \text{ dB}$$

gdzie: i - natężenie dźwięku w dB, i_0 - natężenie dźwięku bezwzględne w W/m^2 , i_0 - natężenie odniesienia dźwięku, które odpowiada dolnej granicy słyszalności tonu o częstotliwości 1kHz. Różnica natężeń odbieranych przez nasz narząd słuchu wyrażona w skali decybelowej może wynosić nawet ok. 130 dB. Ma on przy tym kapitalną możliwość adaptacji do tak różnych poziomów sygnałów. W jednej chwili słyszymy huk padającego drzewa ściętego przez drwala, a już w następnej dobiega nas delikatny śpiew skowronka. Ucho dysponuje też odpowiednim układem zabezpieczającym. Do opisanego wcześniej mechanizmu ucha środkowego przyczepione są dwa delikatne mięśnie. Gdy do ucha wpada głośny dźwięk o niskiej częstotliwości, mięśnie te kurczą się w ciągu 0,01 sekundy, ograniczając tym samym ruch miniaturowych kostek. Zapobiega to (w przypadku dźwięków naturalnych) uszkodzeniom narządu słuchu. Co ciekawe, kiedy mówimy, nasz mózg wysyła odpowiednie sygnały do tych mięśni i zmniejsza czułość całego układu. Dzięki temu nasz głos nie brzmi dla nas za głośno. Nasz narząd słuchu potrafi również wyłowić i śledzić pożądane przez nas sygnały z otaczającego nas szumu np. jakąś rozmowę prowadzoną w gwarnej sali koncertowej, a także rozpoznać fałszywy dźwięk jednego z instrumentów w stuosobowej orkiestrze. Na koniec tego krótkiego wykładu z anatomii jeszcze jedna bardzo ważna sprawa. Wrażliwość ucha ludzkiego na sygnał dźwiękowy zmienia się w zależności od częstotliwości tego sygnału. Wartości natężeń dźwięku tonów o różnych częstotliwościach wywołujących wrażenie jednakowej głośności u osób o zdrowym słuchu tworzą tak zwane krzywe izofoniczne (**rysunek 1**). Z przebiegu krzywych izofonicznych widać, że poziom natężenia dźwięku potrzebny do otrzymania jednakowej głośności jest różny dla różnych częstotliwości. No i jak wam się to podoba? Czy zaczęliście trochę bardziej cenić swoje uszy (nie mówię o zgrabnych małżowinach, chociaż i one odgrywają wielką rolę w przestrzennej lokalizacji źródła dźwięku)? Jeśli tak, to już odczuwam satysfakcję. Ale zabierzmy się wreszcie do tematu głównego, jakim jest nowoczesne protezowanie wad słuchu przy pomocy urządzeń cyfrowych.

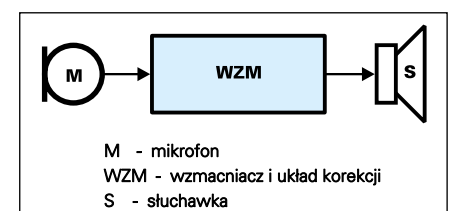


Rys. 1

Co robić, gdy się zepsuje?

Wady słuchu, biorąc w dużym uproszczeniu, powodują najczęściej zmianę progu słyszalności, przy czym może to dotyczyć różnych części pasma akustycznego u różnych osób. Podstawową czynnością, jaką należy wykonać przed próbą zastosowania aparatu słuchowego **badanie audiometryczne**. Określa ono progi słyszenia dla całego pasma akustycznego. To potrafimy już od dawna, ale co dalej? Odpowiedź wydaje się oczywista. Jeżeli słyszalność jest obniżona, trzeba dostarczyć uszom chorego sygnał wejściowy o większej amplitudzie. Ale w świetle tego co wiemy o funkcjonowaniu naszego narządu słuchu zadanie jest ogromnie trudne. Od momentu wynalezienia tranzystorów, a później układów scalonych pojawiły się miniaturowe wzmacniacze (analogowe), które ludziom niedosłyszącym miały poprawiać komfort życia. I ogólnie rzecz biorąc poprawiają. Jednak ci z nas, którzy mieli do czynienia z osobami używającymi takich aparatów (lub sami ich używają) wiedzą, jak niedoskonała, a chwila mi wręcz uciążliwa bywa to pomoc. Bo czymże jest analogowy aparat słuchowy? Schemat blokowy takiego aparatu przedstawia **rysunek 2**. Mikrofon odbiera sygnały dźwiękowe docierające w pobliże ucha, które są następnie wzmacniane przez odpowiednio czuły wzmacniacz liniowy. Na wyjściu wzmacniacza znajduje się słuchawka, której zadaniem jest wytworzenie fali dźwiękowej o amplitudzie przekraczającej próg słyszalności chorego. I tu zaczynają się problemy. Bo o ile można "z grubsza" ukształtować charakterystykę częstotliwościową takiego wzmacniacza, to nie jest możliwe dostosowanie jego wzmacnienia do różnych poziomów sygnału wejściowego. W efekcie albo najcześnie

Rys. 2



dźwięki nie będą słyszalne, albo najgłośniejsze będą za głośne. Zobaczmy to na **rysunku 3a**. Zaznaczono tu całkowity zakres poziomów natężeń dźwięku słyszanych przez osoby o sprawnie działającym narządzie słuchu (jest to obraz uproszczony, bo jak wiemy zależy to również od częstotliwości). Zawiera się on między 0 a 130dB. Jeśli czyjś próg słyszalności wynosi np. 60dB, to oznacza, że dynamika jego narządu słuchu jest mocno zawężona i wynosi $130 - 60 = 70$ dB. Stosując wzmacniacz analogowy możemy "przesunąć" niesłyszane przez taką osobę dźwięki z zakresu 0-60 dB "w górę", ale co wtedy z dźwiękami głośniejszymi?

Nietrudno się domyślić. Też zostaną wzmocnione i "wyjdą" poza górną granicę słyszalności, która jest niestety poziomem bólu. Wszyscy użytkownicy aparatów analogowych, z którymi rozmawiałem, najbardziej bali się nagle pojawiających się dźwięków o dużym natężeniu pochodzących np. od przejeżdżających samochodów, pociągów itp.



Z dobrym aparatem słuchowym nawet pociąg niestraszny

Aparaty takie są oczywiście wyposażone w ręczną regulację wzmocnienia, ale w opisywanych przypadkach jest to rozwiązanie zupełnie nieprzydatne. Tak czy inaczej proste aparaty zbudowane w oparciu o technologię analogową nie są w stanie zapewnić osobie niedosłyszącej odbierania szerokiego spektrum sygnałów dźwiękowych dobiegających z otaczającego ją świata. Niemożliwe

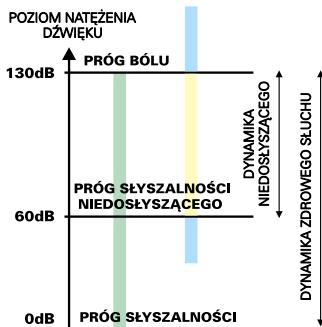
jest też przy ich pomocy zapewnienie odpowiedniego wzmocnienia użytecznego sygnału we wszystkich warunkach akustycznych. Do tego dochodzą jeszcze dodatkowo: szумы własne, generowane przez układy liniowe, skłonność do występowania sprzężeń przy wzmacnianiu małych sygnałów, a także bezradność wobec tak zwanego efektu maskowania. Chodzi o sytuacje, w których mowa ludzka słyszana na tle innych dźwięków staje się dla słuchającego mało czytelna. Dzieje się tak dlatego, że wzmacniacz analogowy wzmacnia najczęściej całe pasmo (niezbyt przecież szerokie) zajmowane przez mowę jedna-

kowo, a niektóre tony tła mają te same częstotliwości co pewne harmoniczne sygnału mowy. Odpowiednio wzmocnione "maskują" część informacji istotnej dla identyfikacji mowy.

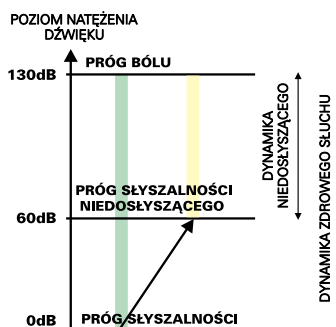
Nadciągają bity, a z nimi nowa jakość

Uświadamiając sobie wszystkie wymienione wyżej mankamenty aparatów analogowych, a dysponując coraz nowszą technologią, specjaliści z firm zajmujących się protezowaniem wad słuchu przystąpili w ostatnich latach do skonstruowania całkiem nowej generacji cyfrowych aparatów słuchowych. Jedną z wiodących w tej technologii firm jest - założony w 1956 roku w Danii przez Christiana Topolmala i Erika Westermana - WIDEX. W roku 1996 firma WIDEX przedstawiła całkowicie cyfrowy aparat SENSO, którego kolejne wersje zawierają coraz bardziej zaawansowane rozwiązania konstrukcyjne. Jak działa cyfrowy aparat słuchowy? Schemat blokowy takiego urządzenia pokazuje **rysunek 4**. Sygnał dźwiękowy, odbierany przez kierunkowy mikrofon elektretowy, zamieniany jest na postać cyfrową w sumacyjno-różnicowym przetworniku A/C. Wejściowa częstotliwość próbkowania sygnału wynosi 1MHz.

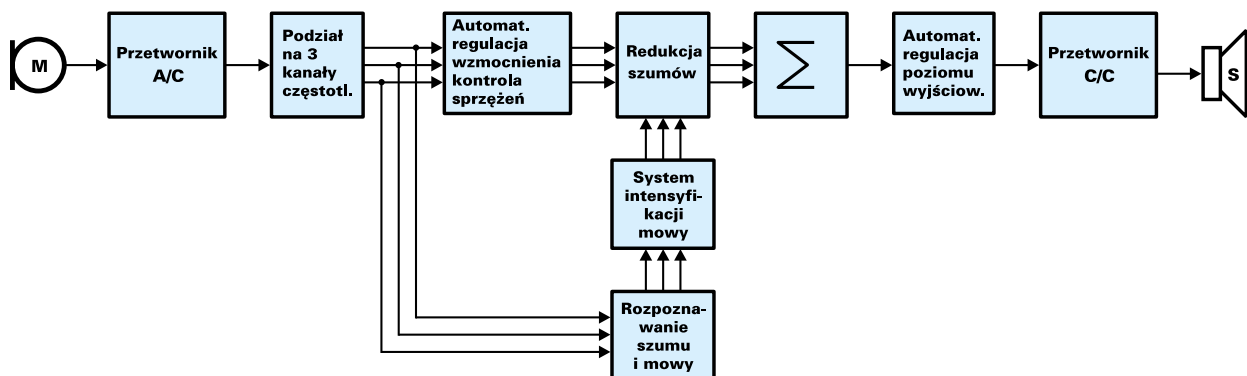
Rys. 3a W aparacie analogowym cały zakres dynamiki dźwięków jest przesunięty w górę w efekcie częstotliwości i tak jest niesłyszalna, a wiele przekracza próg bólu.



Rys. 3b W aparacie cyfrowym cały zakres dynamiki dźwięków zostaje skompresowany i dostosowany do wąskiego zakresu dynamiki niedosłyszącej osoby.



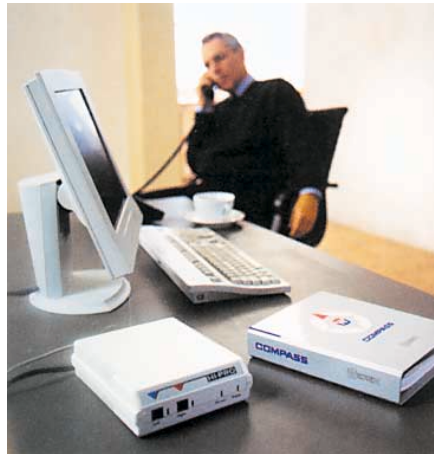
Rys. 4



Na wyjściu przetwornika informacja pojawia się z częstotliwością 32kHz w formie 32-bitowych słów maszynowych. Tak duża częstotliwość próbkowania pozwala systemowi aparatu nie tylko zdefiniować sygnał, ale też zorientować się w jego tak zwanej "tendencji". Również słowo maszynowe opisujące sygnał jest dosyć długie. Tak zapisana informacja trafia do serca aparatu - procesora i od tej pory jest poddawana obliczeniom matematycznym według odpowiedniego algorytmu. Algorytm jest ustalany indywidualnie dla każdego pacjenta, stosownie do jego wady słuchu.

Wszystkie dane wynikające z badania audiometrycznego, których SENSO potrzebuje, aby dostarczyć choremu optymalny dźwięk, zostają wprowadzone przez specjalistę za pomocą specjalnego urządzenia programującego lub zwykłego peceta, poprzez odpowiedni interfejs. Liczba programowalnych parametrów wynosi 180. Procesor musi mieć odpowiednią moc obliczeniową, ponieważ pracuje w czasie rzeczywistym. Znaczy to, że czas obróbki sygnału musi być mniejszy od 1 ms. Pracujący w aparatach SENSO układ ma możliwości porównywalne z procesorem Pentium i wykonuje 40 megainstrukcji na sekundę (40MIPS). Wszystkie konieczne parametry dźwięku: natężenie, częstotliwość, a zwłaszcza wymagania słuchowe pacjenta są brane pod uwagę w procesie obliczeniowym. Dlatego dźwięk docierający do ucha chorego za pośrednictwem aparatu cyfrowego jest "szyty na miarę" potrzeb pacjenta - nigdy nie jest zbyt cichy, nigdy zbyt głośny i ma jakość płyty kompaktowej. Aparat nie wymaga przy tym żadnej regulacji i ma zdolność adaptowania się do zmiennego otoczenia akustycznego.

Specjalista „dopasowuje” procesor sygnałowy do indywidualnych potrzeb pacjenta



Programowanie aparatów cyfrowych.

1. programator LP2
2. programator COMPASS na PC

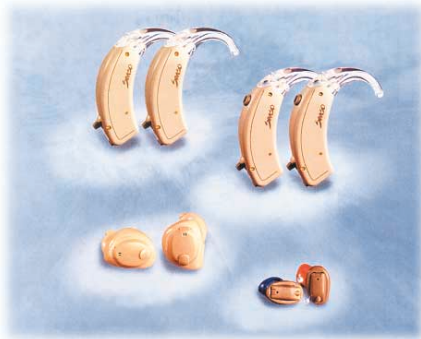
Co to daje w praktyce?

Najważniejszą przewagą aparatu cyfrowego nad analogowym jest to, że stosując odpowiednie algorytmy kompresji dopasowuje (dosłownie przelicza) pełen zakres dynamiki dźwięków otaczającego nas świata do zawężonego zakresu dynamiki narządu słuchu niedosłyszającego człowieka. W efekcie nigdy nie zostaje przekroczony próg bólu, a nawet najcichsze dźwięki są słyszalne (**rysunek 3b**). Aparat cyfrowy zapewnia duże wzmocnienie słabych sygnałów, zachowując przy tym odpowiednio wysoki stosunek sygnał/szum. Pracuje przy tym stabilnie, ponieważ nadzrędnym systemem czuwającym nad całym procesem obróbki dźwięku jest AFM (Automatic Feedback Manager) - automatyczna kontrola sprzężeń. Działa ona w dość zaawansowany sposób. Wzmocnienie aparatu SENSO regulowane jest w trzech oddzielnych kanałach (zakresach częstotliwości). W każdym z nich AFM ocenia, jak duże wzmocnienie jest dopuszczalne w danej chwili. W razie potrzeby wzmocnienie jest automatycznie zmniejszane tylko w jednym kanale, tak aby zawsze zachować możliwie największy zakres słyszanych tonów. Kolejnym "inteligentnym" układem działającym w procesorze SENSO jest Sound Stabiliser (stabilizator dźwięku). Jego zadanie polega na dostrajaniu czasu regulacji wzmocnienia w zależności od relacji intensywności sygnałów wejściowych. O co tak naprawdę chodzi? Otóż na pierwszy rzut oka wydaje się, że im szybciej układ wzmacniacza będzie "podążał" za zmianami wejściowego poziomu natężenia dźwięku, tym lepiej. Okazuje się jednak, że przy słuchaniu np. mowy ludzkiej, tak reagujący system będzie "spłaszczal" odbierane bodźce, tłumiąc tak zwane czasowe i spektralne sygnały pobudzające obecne w mowie (m.in. chodzi o zmianę głośności dźwięku w czasie), co może utrudniać jej zrozumie-

nie. Stabilizator dźwięku analizuje relacje intensywności sygnałów wejściowych i stosuje długi czas regulacji (200-300ms) dla dźwięków takich jak mowa, dzięki czemu zachowane są, ważne dla prawidłowego rozumienia, dynamiczne i czasowe sygnały pobudzające. Daje to w efekcie bardzo łagodne, naturalne brzmienie słyszanej mowy. Ale długi czas regulacji wzmocnienia byłby bardzo niekorzystny w innej sytuacji akustycznej, mianowicie gdy po dłuższej sekwencji dźwięków głośniejszych następuje dźwięk zdecydowanie cichszy. Dobrze ilustruje to sytuacja, w której osoba z aparatem słuchowym wchodząc do domu głośno zawoła: "Wróciłem do domu kochanie! Gdzie jesteś?!" Bez stabilizatora dźwięku ten bardzo głośny sygnał odebrany przez aparat spowodowałby zredukowanie wzmocnienia i ktoś taki nie dosłyszałby cichej odpowiedzi: "Jestem w kuchni". Omawiany układ skraca w takiej sytuacji czas regulacji wzmocnienia do pojedynczych milisekund i zapewnia dobrą słyszalność. Warto wspomnieć o jeszcze jednym, zaawansowanym elemencie obróbki dźwięku w procesorze SENSO. Jest to SIS (Speech Intensification System) - system intensyfikacji mowy. Zapewnia on polepszenie słyszalności mowy ludzkiej na tle hałasu. Chodzi o ograniczenie omówionego wcześniej zjawiska maskowania. Analizując informacje o docierającym do aparatu sygnale dźwiękowym, system ten, posługując się odpowiednim algorytmem, potrafi odróżnić szum tła od mowy (szum najczęściej ma mniejszą amplitudę od sygnału użytecznego, niewiele zmieniającą się częstotliwość i dynamikę) i automatycznie zwiększa wzmocnienie tych częstotliwości, które są najważniejsze dla polepszenia zrozumiałości mowy. Działa on również niezależnie w trzech wspomnianych już zakresach częstotliwości. SIS wyłącza się, gdy do słuchającego dociera tylko szum tła bądź tylko czysty sygnał mowy. Wyniki badań prowadzonych przez laboratorium audiologiczne firmy WIDEX wskazują na znaczne polepszenie zdolności rozpoznawania pojedynczych sylab przez niedosłyszających przy zastosowaniu aparatów wyposażonych w SIS. Oczywiście nie trzeba przypominać, że wszystkie wspomniane regulacje dokonywane są automatycznie, niezauważalnie dla użytkownika. Na wyjściu SENSO pracuje słuchawka cyfrowa wykorzystująca technologię modulacji pulsuwokodowej. Jak widać, jest to rzeczywiście w 100 procentach aparat cyfrowy. Firma WIDEX produkuje obecnie aparaty cyfrowe w czterech wersjach: duże zauszne dla osób o bardzo dużym ubytku słuchu, małe zauszne dla osób z nieco mniejszymi wadami, wewnątrzuszne dla protezowania ubytków średnich, oraz najnowszy aparat serii CIC (Completely In the Canal) wewnątrzkanałowy. Ten ostatni zasługuje na szczególną uwa-

gę. Po założeniu do kanału usznego jest bowiem całkowicie niewidoczny z zewnątrz co przyczynia się do podniesienia komfortu psychicznego niedosłyszącej osoby na niespotykany dotąd poziom. SENSO CIC+ to jeden z najnowocześniejszych aparatów słuchowych na świecie. Montowane w nim mikrofon i słuchawka to podzespoły produkowane przez amerykańską firmę KNOWLES znaną z produkcji urządzeń podsłuchowych na potrzeby agencji wywiadowczych. Struktura procesora wykonana w technologii 0,4 mikrometra ma wymiary 3x4mm. Objętość kompletnego układu elektronicznego wynosi 7mm³. Cudeń-

Zdjęcie różnych modeli aparatów SENSO



ko to jest zasilane z baterii jonowej o średnicy 4mm, o małej rezystancji wewnętrznej, aktywowanej tlenem z powietrza. Średni pobór prądu jest przy tej mocy obliczeniowej zadziwiająco mały i wynosi 0,55mA, co zapewnia czas pracy około 125 godzin. Aparat ten potrafi dostarczyć dźwięk o poziomie natężenia 120dB. Gniazdo baterii jest jednocześnie złączem wykorzystywanym do wstępnego programowania aparatu za pomocą specjalnego urządzenia programującego bądź odpowiednio oprogramowanego peceta. Na koniec mniej entuzjastyczna wiadomość. Cena aparatu SENSO CIC+ wynosi 3600PLN. To dość dużo, zwłaszcza dla osób starszych, których często dotyczy problem ubytku słuchu. Ale z drugiej strony wiele wskazuje na to, że taka inwestycja jest opłacalna. Zwłaszcza w przypadku osób młodszych, przede wszystkim dzieci, których znaczący odsetek również ma kłopoty ze słuchem. Dobry aparat słuchowy może przecież przenieść niedosłyszących w naprawdę wspaniały świat dźwięków i umożliwić im normalne funkcjonowanie w domu, szkole i pracy. Dzieci z wadami słuchu odpowiednio wcześnie protezowane takimi aparatami mają szansę na normalny rozwój. Aparaty cyfrowe tworzą więc zupełnie nową jakość wśród urządzeń wspomagają-



cych słyszenie, doskonale dostosowując się do fizjologii narządu słuchu. W tym więc przypadku wypada dołączyć się do entuzjastycznego okrzyku: Wiwat zera i jedynki!

Wojciech Turemka

Autor dziękuje inż. Cezaremu Szafrąnskiemu za konsultacje.

Więcej informacji o cyfrowych aparatach słuchowych można znaleźć pod adresem www.widex.com