

# Implementacja szybkiej metody wyznaczania psychofizycznych krzywych strojenia na komputerze klasy PC

## 1 Wprowadzenie

Jedną z najefektywniejszych metod określania selektywności częstotliwościowej układu słuchowego jest wyznaczenie tzw. psychofizycznych krzywych strojenia (psychophysical tuning curve, PTC) (Moore, 1999). Chociaż metoda ta nie jest powszechnie stosowana w diagnostyce słuchu, podobnie jak inne metody prowadzące do określenia podstawowych parametrów filtrów słuchowych (np. metoda Pattersona (1976)), to próby jej upowszechnienia czynione są od dość długiego czasu (np. (Zwicker i Schorn, 1978)).

Wyznaczenie psychofizycznej krzywej strojenia dla wybranej częstotliwości, to określenie poziomu, zwykle wąskiego pasma szumu (maskera) w funkcji jego częstotliwości środkowej, który zaledwie maskuje ton o wybranej częstotliwości i niewielkim poziomie (zwykle 10 dB SL). Niewielki poziom sygnału sinusoidalnego pozwala założyć, że obszar błony podstawnej pobudzony tonem jest niewielki i nie przekracza szerokości pasma przepustowego filtra słuchowego o częstotliwości środkowej równej częstotliwości tonu. Zaistnienie zjawiska maskowania (ton jest zaledwie słyszany) oznacza, że pobudzenie wywołane szumem w miejscu na błonie podstawnej, w którym ton wywołuje maksymalne wychylenie, pozostaje w stałej relacji względem pobudzenia wytwarzanego przez ton. Innymi słowy, na progu detekcji tonu, stosunek sygnału do szumu w tym punkcie błony podstawnej jest stały, niezależny od częstotliwości środkowej pasma szumu. Ponieważ pobudzenie wywołane tonem jest stałe (jego parametry, tj. częstotliwość i poziom nie zmieniają się), to w miejscu błony podstawnej, w którym ton wywołuje największe wychylenie, pobudzenie wywołane pasmem szumu jest również zawsze takie samo. Oznacza to, że wyznaczając PTC manipulujemy poziomem i częstotliwością środkową pasma szumu tak, by w jednym, ściśle określonym miejscu błony podstawnej, efekt wywołany szumem był zawsze taki sam. Czy ma to coś wspólnego z wyznaczaniem charakterystyki częstotliwościowej tego punktu na błonie podstawnej?

Charakterystyki układów wyznacza się często zasilając je stałym sygnałem sinusoidalnym, mierząc poziom sygnału wyjściowego w funkcji częstotliwości. Ale jeśli założyć, że mamy do czynienia z układem liniowym, to charakterystykę układu można wyznaczyć postępując odwrotnie: dobierać sygnał wejściowy tak, by na wyjściu otrzymywać zawsze taki sam poziom sygnału w funkcji jego częstotliwości, a otrzymaną w ten sposób zależność odwrócić. Psychofizyczna krzywa strojenia jest właśnie taką zależnością, która po „odwróceniu” ilustruje charakterystykę częstotliwościową jednego punktu na błonie podstawnej, czyli charakterystykę filtra słuchowego. Metodzie tej przypisuje się jednak szereg wad: przede wszystkim układ słuchowy nie jest układem liniowym, w związku z czym proste odwrócenie PTC i nazwanie jej charakterystyką filtra słuchowego nie jest do końca poprawne. Ponadto zakłada ona, że detekcja tonu dokonywana jest w oparciu o filtr o tej samej częstotliwości środkowej co ton, co nie jest do końca poprawne z uwagi na zjawisko wykorzystania filtra słuchowego o częstotliwości innej niż ton (tzw. off-frequency listening) (Moore, 1999). Dlatego warto przeanalizować je nieco dokładniej.

Układ słuchowy jest w ogólności, układem nieliniowym. Jednak wyznaczanie krzywej strojenia, zwłaszcza w otoczeniu jej minimum, bazuje na sygnałach o niewielkich poziomach, dla których funkcja wejściowo-wyjściowa w stanie ustalonym (tzw. charakterystyka dynamiczna) jest liniowa. Również w przypadku odbiorczych uszkodzeń słuchu, których jednym z pierwszych symptomów jest m.in. znaczna redukcja nieliniowości, stosowanie wyższych poziomów nie jest związane z efektami nieliniowymi.

Dokładniejsza analiza zjawiska off-frequency listening pozwala stwierdzić, że może mieć ono niewielki wpływ na kształt PTC: dla szumu o częstotliwości środkowej mniejszej niż ton, na wyjściu filtrów słuchowych o mniejszej częstotliwości niż ton, stosunek sygnału do szumu jest większy i na odwrót. Oznacza to, że zmiana częstotliwości środkowej szumu może prowadzić do zmiany częstotliwości środkowej wykorzystywanego filtra. Jednak stosowanie pasm szumu o większej jak i mniejszej częstotliwości środkowej niż ton pozwala przypuszczać, że następuje wówczas swoista kompensacja wpływu off-frequency listening na kształt, a przede wszystkim na położenie minimum PTC.

Niezależnie jednak od zalet jak i wad, wyznaczanie psychofizycznych krzywych strojenia uważane jest za jedną z najlepszych i najefektywniejszych metod szacowania selektywności częstotliwościowej, coraz częściej stosowaną nie tylko w laboratoriach badających funkcjonowanie słuchu. Metoda ta została niejako odkryta na nowo po tym jak okazało się, że jest ona najdokładniejszą metodą służącą do wykrywania i określania częstotliwościowych granic tzw. martwych obszarów w ślimaku. Martwe obszary, którym poświęcono na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat ogromną liczbę publikacji (np. (Moore *i in.*, 2001; Skrodzka i Sęk, 2002; Vinay i Moore, 2010)), definiowane są najczęściej jako te miejsca na błonie podstawnej, w których wewnętrzne komórki rzęsaty lub/i neurony je unerwiające nie funkcjonują; lub szerzej: jeśli informacja o pobudzeniu pewnego obszaru błony podstawnej (pewnym zakresie częstotliwości) nie jest transmitowana (dostępna) na wyższe piętra drogi słuchowej, to ten obszar częstotliwości nazywany jest zwykle obszarem martwym.

Martwego obszaru, a właściwie jego częstotliwościowych granic, nie można zdiagnozować w oparciu o badanie