

FRI-2G.307-1-AS-02

SOME FEATURES OF THE HUMAN AUDITORY SYSTEM¹²

Assoc. Prof. Pavel Stefanov, PhD

Department of Soundengineering and Sounddesign,
National Academy of Music “Prof. Pancho Vladigerov” – Sofia
Tel.: 0896-820 471
E-mail: pavel_stfnv@mail.bg

Abstract: *The human auditory system has enormous capabilities for perceiving and processing sound signals. Modern three-dimensional surround systems have been developed using in-depth knowledge of the features and conditions of human hearing. This essay discusses a few psychoacoustic regularities that affect human auditory perception.*

Keywords: *Psychoacoustics, Absolute Hearing Thresholds, Differential Hearing Thresholds, Loudness, Critical Hearing Bands*

ВЪВЕДЕНИЕ

Психоакустиката е наука, чиято основна цел е установяване на ясна и директна корелация между количествените зависимости на външните звукови стимули (физическите параметри на звука) и характеристиките на субективните физиологични и психологически усещания, които те предизвикват. Психоакустиката е част от психофизиката, която изучава въздействието на всички външни стимули (светлина, звук, налягане, химическа енергия и др) върху сензорните органи (зрение, слух, осезание, обоняние, и т.н.). Психоакустиката по принцип се занимава с изучаване на въздействието на всички видове звуци върху сензорните органи на слуха, като значителна част от нейното внимание се съсредоточава върху музикалните звуци и тяхното субективно психологическо възприятие и отражение.

По принцип звукът като физическо явление притежава определен набор от физически характеристики. Това са параметри, позволяващи *обективно и точно* измерване – честота, продължителност, спектър, местоположение в пространството, и др. Попадайки на входа на слуховата система, звуковите сигнали предизвикват определени усещания, които се характеризират със *субективни* параметри като височина, сила, тембър, маскиране, локализация, трайност и т.н. Основната задача на психоакустиката е да създаде връзка между обективните параметри и субективните усещания.

Полето на психоакустиката очертава широк спектър от проблеми и направления, свързани с човешките слухови възприятия. От една страна това са границите на възприятие и възможности за обработка на звукови сигнали. От друга страна централен обект на изследване на психоакустиката са нелинейните свойства на слуха, разликата и зависимостите в слуховите възприятия по отношение честотните, итнезитетните и времевите параметри на звуковите сигнали. Трети изключително важен дял от психоакустичната проблематика са бинауралните характеристики на слуховото възприятие, начина по който човек използва двата симетрични слухови органа и отражението на променливите физически характеристики на звуковите вълни върху качеството и пространствените детерминанти на слуховия образ.

Изследванията на психоакустиката са много важни за разработването на съвременните многоканални съраунд системи. Бурното развитие на триизмерния звук в киното се дължи на създаването на психоакустични модели на възприятие на звука, и алгоритми за адаптация на звуковата среда към пространствения начин на възприятие на човека. Това е характерно за

¹² Докладът е представен на конференция на Русенския университет на 28 октомври 2022 г. в секция Изкуствознание с оригинално заглавие на български език: **НЯКОИ ОСОБЕНОСТИ НА ЧОВЕШКАТА СЛУХОВА СИСТЕМА.**

всички жанрове филми, като „все повече се използва разработеният арсенал на „голямото кино“ – богатството на обемния, многоканален звук, постигането на оптимално качествени звукозаписи, както на терен, така и в студийна среда, допълнителна, прецизна синхронизация...“ (Крачунова-Попова, В., 2017).

Друго много перспективно поле на приложение за психоакустичното знание са системите и инструментите за шумопотискане, за обезшумяване на звуко с допълнителни паразитни примеси на шум. В тази посока все още има необходимост от допълнително развитие и усъвършенстване на алгоритмите, тъй като „шумоподтискащите филтри работят относително добре (само) при ниски до средни нива на ошумяване...“ (Крачунова-Попова, В., 2017), докато при високи нива на шумови примеси „тези системи отнемат определените честоти от целия честотен спектър на файла...“ (Крачунова-Попова, В., 2017).

Настоящата статия ще се съсредоточи основно върху граничните условия и функционалните рамки на слуховата система на човека, ще анализира минималните условия за детекция на количествени изменения във възприятието на даден звуков параметър. Допълнителен паралакс ще бъде представен по отношение практическата корелация на психоакустичното познание и началното музикално и нотно оgramотяване на децата в начална училищна възраст. Изследването и експериментите с различни темброви варианти и разнообразна времева продължителност на сигналите „провокират фантазията и музикалните компетенции на детето на различни равнища“ (Стефанова, П., 2020).

ИЗЛОЖЕНИЕ

Човешката слухова система е изключително сложна, като притежава огромни перцептивни и функционални възможности. Въпреки това тя има някои ограничения които се детерминират по отношение възприятието на честотния и динамичния диапазон. Това са лимитации във връзка със способността да определи различия между два отделни звука (т.е. има ограничена разделителна способност); и по отношение способността за възприятие на пределни звуци, за претоварване в нивото на интензивност.

Границите на слухови усещания, наречени *слухови прагове*, са много важни от практическа гледна точка. В съвременната аудио-технология именно на база изследванията и резултатите на психоакустиката във връзка със слуховите прагове се прилагат алгоритми и принципи, чиято цел е всички изкривявания, внасяни от звукотехническите системи, да бъдат минимизирани и направени „незабележими“ от слуха, да паднат под съответните слухови прагове.

Абсолютните прагове на слуха се определят от минималните стойности на обективните параметри на звука (интензивност, честота, продължителност, ...), при които възникват слухови усещания. Те определят чувствителността на слуховия апарат спрямо даден параметър – колкото е по-нисък слуховия праг, толкова по-висока е чувствителността.

Диференциалните прагове на слуха определят възможностите за регистриране на минимални различия между сходни като физически параметри звуци.

От почти два века е известно, че човешкият слух има огромни възможности като чувствителност – както за възприятие на честотен и динамичен диапазон, така и като възможности за диференциация на различия между звуците. Слуховият праг по отношение най-тихият възможен звук отчита сигнал с интензивност 10^{-12} W/m^2 , или звуково налягане $p_1 = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa} = 0 \text{ dB SPL}$. От друга страна слухът интерпретира като „звук“ звуково налягане от 120 dB SPL ($p_2 = 20 \text{ Pa}$). Това съответства на разлика в налягането от 1 милион пъти ($p_2/p_1 = 10^6$). В честотно отношение слухът регистрира от 16 до 20 000 Хц, като границите (особено горната) много зависят от възрастта и начина на живот.

Абсолютните прагове на слуха очертават реалните граници на слуховите усещания и се определят преди всичко по отношение на обективните параметри на звука интензивност (звуково налягане), честота и продължителност.

Абсолютен праг на чуване се определя като минималното ниво на звуково налягане в дБ, при което възниква слухово усещане. Този праг определя чувствителността на слуха спрямо интензивността на звуковата енергия. Този праг зависи от много фактори – опит, характеристики на звуковия сигнал, параметри на звукоизточника, и т.н. Резултатите от измерванията обобщават голям брой изследвания с многобройни участници, с цел представителност на получените данни. Измерванията са проведени за различни честоти, при което за всяка честота се определя праг на чуване.

Прагът на чуване за синусоидални вълни се изменя в много широки граници в зависимост от честотата. Най-голямата чувствителност на слуха е в областта 2500 – 3500 Хц, където прага на чуване е най-нисък. Трябва да се отбележи, че при бинаурално слушане (с двете уши) слуховите прагове са с 3 дБ по-ниски от моноауралното слушане.

В международен стандарт ISO R-226:2003 са приети следните стойности за прагове на чуване:

Честота Hz	100	200	400	800	1000	2000	3150	5000	8000	12500
Ниво dB	25,1	13,8	7,2	4,4	4,2	1,0	-3,6	-1,1	15,3	11,6

Тези стойности са установени при звук възпроизведен от високоговорители в свободно поле, слушатели на възраст 18-30 години, звукоизточник разположен на 0° по симетричната ос на слушателя.

Абсолютните прагове на слушане зависят и от продължителността на звука – ако дължината на сигнала е малка (под 250 мс) то праговете се повишават, като степента на повишение зависи от честотата. За сигнали по-дълги от 250 мс слуховите прагове се стабилизират около нормата, като при по-кратки сигнали интензивността трябва да бъде по-висока, за да бъдат отчетени.

Горната граница на човешката слухова чувствителност определя най-силните звуци, достъпни за регистрация от слуха. Тя е известна като *праг на болката*. Тази граница не е така рязко очертана като долната. При синусоидални вълни стойността от 10 Па (100 дБ) достига *праг на неприятно усещане*. При достигане на 60-80 Па (132 дБ) възниква усещане за физическо налягане (натиск) в ушите. Звуково налягане от 150-200 Па (140 дБ) достига т.н. *праг на болката* и е предпоставка за настъпващо увреждане.

Трябва да се отбележи, че човешкият слух е приспособен преди всичко за възприемане на звук с малка и средна интензивност. Според данните на изследванията в последните години слуховите прагове значително са се повишили, т.е. общата слухова чувствителност се е понижила при хората от т.н. развити страни. Като причини за това могат да се посочат високите нива на звуково замърсяване и прекомерната слухава стимулация в „цивилизования“ свят.

Друго важно ограничение на слуховата система очертават *абсолютните слухови прагове по честота*. От много време се знае, че само звуци с диапазона 16-20 000 Хц се възприемат като слухови усещания. Честотите около 20 000 Хц могат да се усетят само в ранна и младежка възраст. Средно чувствителността на слуха за високи честоти се понижава средно с 1000 Хц на 10 години. За възраст около 60 години средната чувствителност във високи честоти не надвишава 10-12 кХц. Тъй като основната енергия на музикалните звуци е концентрирана в областта от 40 до 5000 Хц., а при говор до 1000 Хц, нормалното възрастово понижение на слуховите прагове не засяга сериозно когнитивното възприятие на говор и музика, но редуцира качеството на перцепция.

Важен аспект на функционалните характеристики на слуха е възможността за определяне на минимални изменения в звуковите сигнали. Това са т.н. *диференциалните слухови прагове*, които очертават разделителната способност на слуховата система по отношение амплитуда (интензивност), честота, и продължителност на звука.

Амплитудните диференциални прагове (АДП) на слуха са важни за установяване на минималните промени в интензивността на звука, които предизвикват съответните промени във възприетата гръмкост.

При установяване на АДП има два подхода на изследване с цел изясняване на различните аспекти на възприятие. В съответните експерименти се използват множество участници, и резултатите се обобщават статистически за максимална представителност. За достоверен резултат се приема съвпадение на показанията най-малко на 75% от участниците.

В първият вид експерименти се използват две синусоиди с еднаква честота, и различна гръмкост. Установени са зависимостите на АДП от честота и ниво на сигнала, като минималната разделителна способност на слуха във връзка с нивото на гръмкост съществено зависи от честотата на сигнала. Най-малките стойности са получени за средни честоти – 500Хц - 4кХц, при ниски честоти праговете се увеличават. Общото ниво на сигнала оказва сериозно влияние върху стойностите – колкото по-силен е сигналът, толкова по-малки разлики могат да бъдат усетени. За сигнал с честота 1000 Хц и ниво 40дБ праговете са на 1,25дБ, а при усилване на сигнала до 80дБ спадат на 0,6дБ.

Вторият тип експерименти са свързани с амплитудно-модулиран синусоидален сигнал. Най-голяма чувствителност на слуха е установена при честота на амплитудната модулацията 4 Хц, и всички последващи изследвания се провеждат при тази модулация. Така е установено точното ниво на звуково налягане, при което измененията в гръмкостта, обусловени от амплитудната модулация, стават забележими. На тази база са получени стойности за зависимостта на амплитудната разделителна способност на слуха от честотата на сигнала, при различни нива на гръмкост.

В резултат на обобщените изследвания с двата метода, за чисти тонове с ниво 40 – 80 дБ амплитудните диференциални слухови прагове в областта на средни честоти е са установени в интервала **0,5 – 1 dB**.

Необходимо е да се отбележи, че при сложни музикални сигнали диференциалните прагове съществено зависят от вида музикален материал, опита на слушателя, качествата на помещението, и т.н. При отчитане на общия динамичен диапазон на слуха от около 120 dB, фината диференциална чувствителност на човешкото ухо може да отчете достатъчно много градации на гръмкост при музикалните композиции.

Честотни диференциални слухови прагове. Честотната разделителна способност на човешкия слух може да бъде установена посредством емпирични експерименти. На слушателите се представят два синусоидални сигнала с еднаква интензивност, като на самите тях се дава възможност да променят честотата на единия спрямо другия (приет за контролен), докато бъде отчетена разлика във височината на сигналите. По този начин са установени честотните диференциални прагове (ЧДП) в зависимост от честота, ниво на гръмкост и продължителност на сигналите.

Анализът показва, че ЧДП зависят от честотата и от интензивността на сигнала. Усреднените резултати сочат, че в обхвата до 1000 Хц ЧДП са от порядъка на 2-3 Хц, като за определени честоти (600 – 700 Хц) могат да достигнат около 1 Хц. От 1 кХц до 10 кХц праговете нарастват постепенно до 40 Хц за 10 кХц. Понижаването на гръмкостта води до увеличаване на ЧДП, т.е. колкото по-тих е звука, толкова по-трудно се определя разликата в честотата спрямо друг звук. Ако представим този праг под формата на музикални интервали, за честоти до 1000 Хц прагът е около 5 цента.

Времеви диференциални прагове (ВДП). Под това понятие се разбира способността на слуха да различава малки изменения във времевата структура на сигнала. Изследванията върху разделителната способност на човешкия слух във времевата област се провеждат в няколко направления:

- анализ на минималната времева продължителност, в течение на която слухът е в състояние да различи два сигнала. Изследванията с тонални сигнали показват, че диференциалният праг на минималното време, необходимо за установяване на два различни сигнала, следващи един след друг, е 2 мс. Тази величина е почти константа, като не зависи

особено от честотата на тоновете, нито от интензивността. Но за да се определи кой от сигналите идва пръв е необходим праг от 20 мс. Необходимото време за определяне на височината на тона варира в широки граници – за ниски честоти са необходими около 60 мс, за високи честоти – около 15 мс.

- анализ на диференциалната чувствителност на слуха по отношение изменението на продължителността на звуковия сигнал (трайността). Експериментите се провеждат по следния начин: на участниците се представят два сигнала, единия контролен с продължителност T мс, другия с малко по-голяма дължина $T + \Delta T$ мс. Сигналите се подават в случаен ред, а участникът трябва да определи сигнала с по-голяма продължителност. Основният извод се заключава в това, че интервалът ΔT започва да се намалява при намаляване на общата продължителност на въздействието на сигнала, т.е. колкото по-кратки са сигналите, толкова по-малки разлики по време между тях могат да бъдат засечени.

- изследвания на чувствителността на слуха към промени във времето за атака (завучаване) и затихване (отзвучаване) на сигнала. Времето на т.н. преходни процеси (атака и отзвучаване) е индивидуална характерна особеност на различните музикални инструменти, като промяната на времето за атака или отзвучаване води до промени в тембра на възприетия тон. Изследвания върху ВДП за времето на завучаване в милисекунди са проведени с различни сигнали. За тонални сигнали (правоъгълна вълна със синусоидално запълване) резултатите сочат, че диференциалният праг за времето на атака (както и на отзвучаване) за честотите под 1000 Хц = 1 мс, за честотите 1 кХц – 10 кХц = 0,5 мс. Промени с по-малка дължина от тези граници на времето за атака и отзвучаване не могат да бъдат засечени от страна на човешкия слух. За реални музикални сигнали тези стойности нарастват в известна степен поради маскирането на съседни звуци.

ИЗВОДИ

Абсолютните и диференциалните слухови прагове са от голямо значение за общото психоакустично познание. Нещо повече, доброто познаване механизмите на работа и начините на обработка на звуковата информация от страна на човешкия слух са в основата на успешното имплементиране на музикално-акустичните зависимости и характеристики в музикални-изпълнителската практика. Развитието на музикалния слух, музикалното и нотно ограмотвяване, както и възпитанието в естетическите категории на музикалното изкуство трябва да започва още от най-ранна детска възраст. Въз основа на психоакустичните закономерности могат да се предвидят и системно да се конструират последователни секвенции от упражнения и занимания, запознаване, навлизане и задълбочаване на контакта на малките деца с „голямата и прекрасна музика“. Развитието на въображението на децата и в частност на музикалните представи и модели е една от дейностите, които могат широко да се ползват от установените психоакустични закономерности за възприятие и обработка на звук. „Именно чрез въображението се провокира и изгражда представата за музикалните образи“ (Стефанова, П., 2014), което е предпоставка за възпитание на художествено компетентни бъдещи музикални слушатели с отношение и респект към професионалното музикално изкуство. Осъзнаването на възможностите и границите на слуха при детето, „съчетанието от звуци и „естествени“ форми е мощен генератор на идеи в детското съзнание, особено като се има предвид силата на впечатленията и фантазните образи в ранна възраст.“ (Стефанова, П., 2018)

REFERENCES

- Aldoshina, I., Pritts, R. (2006). *Musical acoustics*. Composer St Petersburg.
- Krachounova-Popova, V. (2017). *Sound in documentary cinema*. Dissertation, NATFA "Krastyo Sarafov", 2017. (Оригинално заглавие: *Звукът в документалното кино*).

Krachounova-Popova, V. (2017). *Specificity of sound in documentary cinema. A symbiosis of approaches*. Cinema Magazine, issue 4/2017. (**Оригинално заглавие:** Специфика на звука в документалното кино. Симбиоза на подходите).

Krachounova-Popova, V. (2017). *The Sound Environment in the Films of Julius Stoyanov*'. Yearbook of NATFA "Krastoy Sarafov", 2017, pp. 225-229 (**Оригинално заглавие:** Звуковата среда във филмите на Юлий Стоянов').

Stefanova, P. (2018). *Alternative Musical Instruments - A Look to the Future in Music Pedagogy*, NBU Scientific Conference, 2018 (**Оригинално заглавие:** Алтернативните музикални инструменти – поглед към бъдещето в музикалната педагогика).

Stefanova, P. (2014). *Sounding a literary text as a form of developing the creative thinking of preschool and primary school-age children*. Almanac of NMA "Prof. Pancho Vladigerov" 2014. (**Оригинално заглавие:** Озвучаването на литературен текст като форма на развитие на творческото мислене на децата от предучилищна и начална училищна възраст).

Stefanova, P. (2019). *Music workshop: ideas, tasks, examples from practice*. Pedagogical Novelties Magazine, Issue 1, Year IX, 2020, pp. 67-73. (**Оригинално заглавие:** Музикално-творческо ателие: идеи, задачи, примери от практиката.)

Dickreiter, M. (2003). *Mikrofon-Aufnahmetechnik*. Hirzel, Stuttgart

Everest, F. A., Pohlmann, C. K. (2009). *Master Handbook of Acoustics*. McGraw-Hill Companies, Inc.

Meyer, J. (2009). *Acoustics and the Performance of Music*. Springer Science+Business Media, LLC.