

FRI-12.23-1-AS-02

SOME FEATURES OF THE HUMAN AUDITORY SYSTEM²⁷ – PART 2

Assoc. Prof. Pavel Stefanov, PhD

Department of Soundengineering and Sounddesign,

National Academy of Music “Prof. Pancho Vladigerov” – Sofia

Tel.: 086-820 471

E-mail: pavel_stfnv@mail.bg

Abstract: *The human auditory system has enormous capabilities for perceiving and processing sound signals. This paper is a continuation of the one presented at the last Russe University conference 2022, addressing additional important properties of hearing - loudness (perception of loudness) and masking (changing hearing sensitivity to certain sounds in the presence of others with specific parameters). The development of the latest three-dimensional surround sound reproduction systems is based on detailed knowledge of the characteristics and operating conditions of human hearing. This determines the importance, relevance and intensity of such research nowadays.*

Keywords: *psychoacoustics, loudness, critical hearing bands, masking, decibell, adaptation.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Човешкият слух има невероятната способност да реагира на слухови сигнали както с много ниска интензивност (звуково налягане от 2×10^{-5} Pa при ниво 0 dB SPL, т.н. праг на чуване), така и с много висока интензивност (звуково налягане от 20 Pa при ниво 120 dB SPL, т.н. праг на болката). Разликата между двете гранични стойности е над 1 000 000 пъти. Субективното усещане, което тези звукови нива предизвикват, се нарича **гръмкост**. Под гръмкост се разбира възприетата от човек сила на звука.

Гръмкостта е свързана преди всичко с интензивността на звука. Интензивността на звука е в пряко съотношение със звуковото налягане, което може да се изрази математически така: $I = p^2/\rho C$ (където „ p ” е плътността на въздуха, „ C ” – скоростта на звука). Логично колкото е по-голямо звуковото налягане, толкова по-висока е гръмкостта. Но гръмкостта зависи не само от интензивността на звука, а също и от честотата, от спектралния състав, и от продължителността на звука. При определени условия е напълно възможно да съществуват звукови сигнали с много висока интензивност, които обаче не предизвикват усещане за сериозна гръмкост на звука (например ако тези сигнали са твърде кратки (по-малко от 35 ms), или с твърде ниска честота (под 20 Hz)).

Гръмкостта е субективно качество на звука. То се характеризира с възприятието на слушателя за сила на звука и поради това не може да бъде измерено директно. Понастоящем работата по точната количествена корелация между обективните параметри и сетивното впечатление продължава чрез разработване на компютърни модели на слуховата система, които биха позволили това да се осъществи. До този момент оценките на усещането за сила на звука при промяна на различни параметри на звуковия сигнал се получават по метода на субективната експертиза. По същество това са многобройни експерименти, сложни и трудоемки, които натрупват статистически данни, и стават основа за продължаващи изследвания и непрекъснато увеличаваща се база данни и публикации за усъвършенстване и прецизиране на получените резултати.

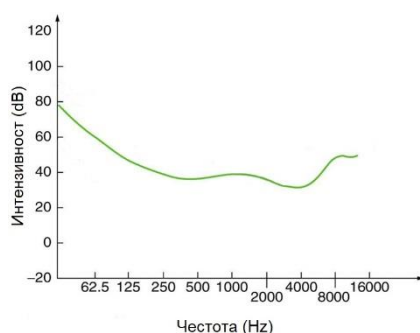
²⁷ Докладът е представен на конференция на Русенския университет на 27 октомври 2023 г. в секция „Езикознание, литературознание и изкуствознание“ с оригинално заглавие на български език: НЯКОИ ОСОБЕНОСТИ НА ЧОВЕШКАТА СЛУХОВА СИСТЕМА – ЧАСТ 2.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Тоналните звуци притежават специфична гръмкост. Класифицирането на звуците по гръмкост и определянето на влиянието на основните параметри на звуковия сигнал върху възприятието се извършват за тонове с различен интензитет, честота и продължителност. Основно се използват относителни методи за оценка на силата на звука, тъй като установяване на абсолютна стойност на възприетата сила е изключително трудно.

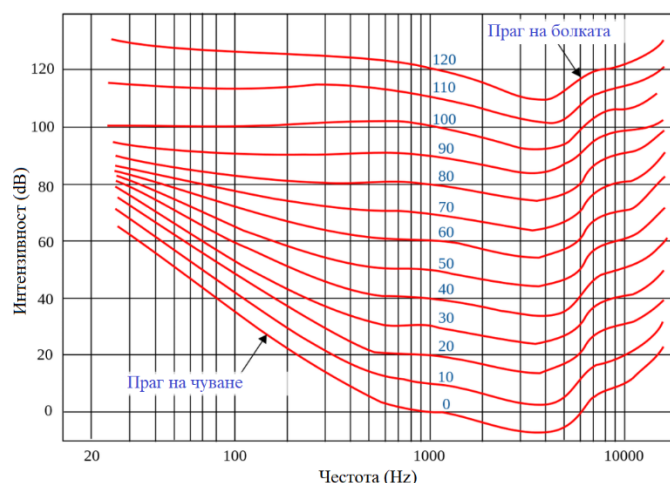
Най-честия метод за определяне нивото на сила се състои в провеждане на конкретни експерименти. Например определя се референтен сигнал с честота 1000 Хц и ниво на звуково налягане 40 dB. След това на експерименталният субект се подават сигнали с различна честота, напр. 100 Hz, и той има за задача да регулира нивото му така, че сигналът да бъде равен по сила на референтния.

Следва обобщение на получените стойности за звуково налягане, при което сигналите с различни честоти изглеждат еднакво силни спрямо референтния сигнал. Това очертава специфична крива в графично изображение, показано на фиг. 1.



Фиг. 1 – Крива на еднаква гръмкост за звуково налягане от 40 dB SPL

От фигурата става ясно, че звук с честота 100 Хц трябва да има ниво от 50 dB, за да изглежда еднакво силен със референтния звук от 1000 Хц и ниво 40 dB. При честота 50 Хц необходимото ниво за изравняване на гръмкостта е около 65 dB. Получената линия се нарича крива на еднаква гръмкост за 40 dB. След провеждане на подобни експерименти за всички възможни нива на еталонния сигнал резултатите се обобщават в графичен вид както показва фиг. 2.

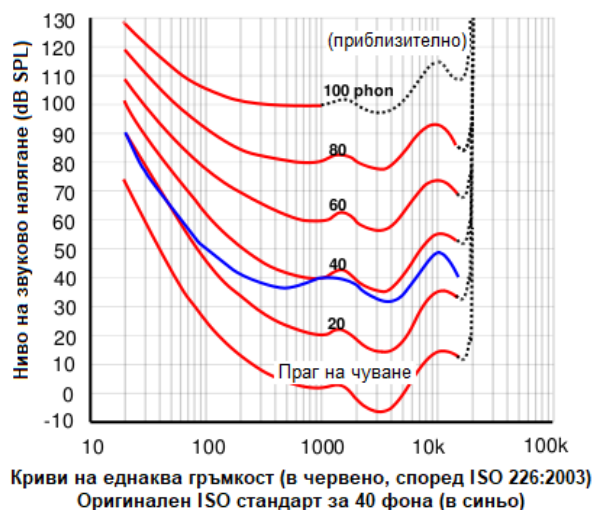


Фиг. 2 – Криви на еднаква гръмкост, или криви на Флетчър и Мънсен

Те се наричат *криви на еднаква гръмкост*. За пръв път те са получени вследствие експериментите на Флетчър и Мънсен през 1933г, и дълго време носят техните имена. Понастоящем в международния стандарт ISO-226 (2003) са приети усъвършенствани

варианти на кривите, получени чрез изследвания в свободно звуково поле (заглушена камера), и възпроизвеждане от говорител.

Опит за обективизиране на гръмкостта и точно количествено измерване е направен чрез въвеждане на понятието *Ниво на гръмкост*. Това е стандартизирана мярка за измерване гръмкостта на звука, която отчита нелинейната природа на слуха. Под *ниво на гръмкост* на даден звук се разбира нивото на звуковото налягане на еталонен звук с честота 1000 Hz, който е равен на оценявания звук. Нивото на гръмкост се измерва в специални мерни единици – **фонове (phons)**. Това не е пряка връзка между нивото на звуково налягане в dB и възприетата сила. Структурата на фоновите стойности представлява перцептуално скалирана мярка, която отразява колко силен изглежда даден звук за човешкия слух.



Фиг. 3 – гръмкост във фонове

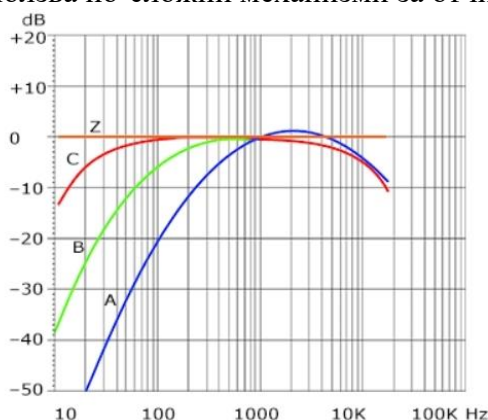
Цифрите над кривите на фигурата съответстват на количеството фонове, което съвпада със стойностите в dB за 1000 Хц. Познавайки честотата на даден сигнал и нивото на звуковото му налягане, е възможно, като се използват представените криви, да се определи нивото на неговата сила във фонове: например, ако звуков тон с честота 100 Hz има ниво на звуково налягане 60 dB, то, като се проследят линиите, съответстващи на тези стойности, може да се намерим в пресечната, което в дадения случай означава, че този звук има ниво на гръмкост около 50 фона.

Анализът на тези криви показва, че при ниски нива на звуково налягане преценката за силата на звука е силно зависима от честотата. Слухът е по-малко чувствителен към ниските и високите честоти, при които са необходими много по-високи нива на звуково налягане в тези честотни области, за да се създаде звук, равен по гръмкост на референтния звук при 1000 Hz. При по-високи нива кривите се изравняват, нарастването на ниските честоти става по-плавно, т.е. при високи нива ниските, средните и високите честоти стават по-малко стръмни и се оценяват по-равномерно като гръмкост.

Това има съществено значение за звукозаписа и нивата на прослушване. Когато записът се възпроизвежда на нива равни на оригиналният звукоизточник, то естествения баланс на гръмкостта се запазва. Когато записът се възпроизвежда по-тихо, слуховите усещания за високи и ниски честоти се понижават.

Тези способности на слуха да възприема и оценява по различен начин гръмкостта в зависимост от честотата и нивото на звуково налягане се отчитат от съвременните инструменти за измерване на шум и други сложни звуци. В тях се използват коригиращи криви (филтри), „аналогични“ на слуховите криви, които отслабват ниски честоти в зависимост от нивото на сигнала, както действа слуховата система. Използват се най-често три подобни криви – крива А със спад от 30 dB на нивото за 50 Хц по отношение на нивото

на 1000Хц, крива В със спад от 12 dB и крива С със спад от 2 dB. Когато тези криви се насложат върху кривите на еднаква гръмкост, се вижда че А съответства на фонова крива от 30 dB, В – на 70 dB и С на 100 dB. Измерените стойности се обозначават dB-A, dB-B, dB-C. Разбира се тези криви позволяват нивото на гръмкост да се измери само приблизително, защото слуховата система използва по-сложни механизми за отчитане на гръмкостта.



Фиг. 4 – корекционни криви за измерване на гръмкостта

А-кривата е общоприета за коригирано измерване на нива на звук, отговарящи на ниска и средна гръмкост. В повечето случаи тя показва добра корелация с възприеманото ниво на звук и на шум, макар че понастоящем има някои несъответствия между определни регулаторни разпоредби и измерванията на шум в околната среда.

В-кривата вече е излязла от реална употреба. Тя е била предвидена за корекция при измерване на средни нива на гръмкост, но поради критичните резултати, показвани в нискочестотната област, нейното приложение се оценява като недостатъчно състоятелно.

С-кривата е предвидена за измерване на високи и пикови нива на звуково налягане. Тя приблизително следва кривата на еднаква гръмкост за 100 фона. Тя се отнася доста точно към реакцията на човек спрямо високи нива на звук и шум, както и корелира по-точно с предизвиканата от високото звуково налягане загуба на слухова чувствителност.

Z-кривата указва липса на честотно коригирано измерване (Z от „zero“). Тя е въведена през 2003 (IEC 61672) за да замени плоските или линейните филтри.

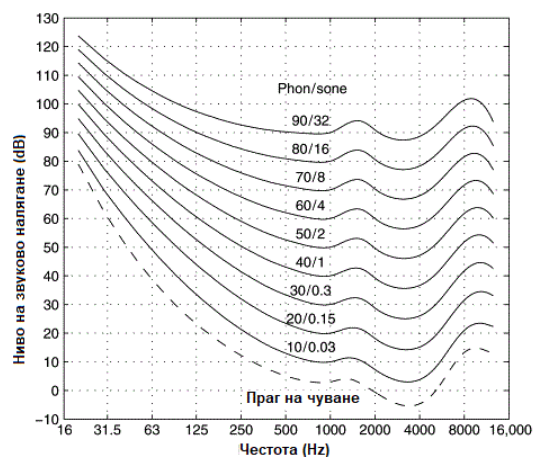
Оценката на нивото на гръмкост не е еквивалентна на промяната на абсолютната гръмкост. Например, ако имаме два сигнала с ниво на гръмкост 40 фона и 80 фона, то не е задължително единия да се усеща два пъти по-силен от другия. Връзката на нивото на гръмкост с абсолютната гръмкост е много по-сложна, и затова са направени опити да се създаде скала за абсолютното усещане за гръмкост в зависимост от интензивността, честотата, продължителността и други обективни параметри на звука.

Така възниква единицата **сон (sone)** за количествена оценка на абсолютната гръмкост. Като единица за възприета гръмкост сонът е по-директна мярка за субективната сила на звука, възприета от човек. Скалата на соновете се калибрира с референтна стойност, представляваща гръмкост от 1 сон равна на гръмкостта на синусоида 1000 Хц с ниво 40 dB, или 40 фона. Основното предназначение на единицата сон е да служи като количествена мярка за субективната сила на звука.

Връзката между възприетата гръмкост на звука в сонове и звуковото налягане в паскали изглежда така:

$$S = C p^{0,6}$$

където C = константа, зависеща от честотата. Очевидно зависимостта е нелинейна, и когато нивото на звуково налягане се увеличи 10 dB, гръмкостта нараства 2 пъти. Подобна нелинейна връзка съществува за всички сетивни възприятия на човека.

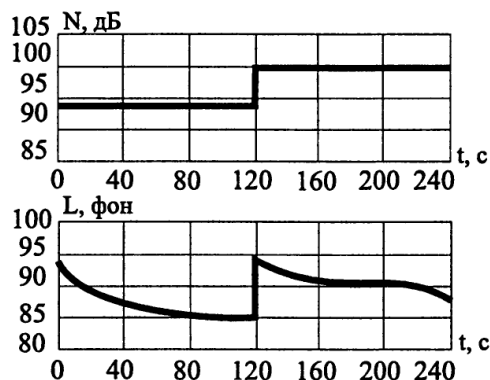


Фиг. 5 – връзка между гръмкостта във фонове и сонове

Нивото на силата на звука във фонове представлява мярка за физическата интензивност на звука, коригирана спрямо човешкото възприятие. Гръмкостта в сонове е мярка за възприеманата сила на звука и е пряко свързана с нивото на силата на звука във фонове. Може да се обобщи, че phon е единица за ниво на силата на звука, която отчита честотните характеристики на човешкия слух, докато sone е единица за възприета сила на звука, която осигурява по-пряка мярка за това колко силен е даден звук, който се възприема субективно. Двете единици са свързани чрез общото използване на нивото на силата на звука във фонове като референтна точка.

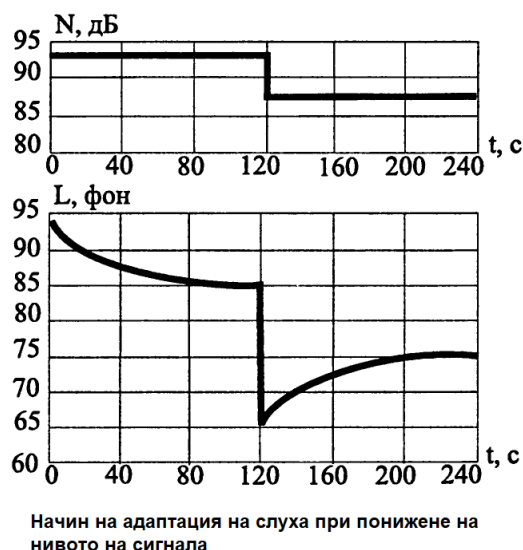
Гръмкостта зависи също и от продължителността на сигнала. Според резултатите от експеримент, при който два звука с еднаква гръмкост, но с различна дължина, се подават на обекта за прослушване, по-краткият се възприема като по-тих, с по-ниска гръмкост. Тези резултати са валидни за дължини до 250 мс, след което преценката за гръмкост се стабилизира на база обективните показатели.

Свойството *адаптация* на човешкия слух също следва да бъде разгледано в светлината на възприятието за гръмкост. Адаптацията на слуха се проявява при въздействие на продължителни силни сигнали със сравнително постоянна величина, при което чувствителността на слуха постепенно намалява, понижава се възприетата гръмкост. Това е един от защитните механизми на слуха, чувствителността се понижава пропорционално на интензивността на звука. Фигури 6 и 7 илюстрират нагледно адаптацията на слуха в двете възможни посоки.



Начин на адаптация на слуха при повишаване на нивото на сигнала

Фиг. 6



Фиг. 7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чувствителността на слуха по отношение гръмкост и особеностите на човешкото възприятие са едни от най-важните индикатори за формиране на общото слухово усещане. Както е известно съществува неразривна и фундаментална връзка между всичко в природата, и респективно в човешката слухова система гръмкостта е много тясно и взаимозависимо обвързана с друго фундаментално качество – ефекта на маскиране. Маскирането е едно от най-важните свойства на слуха. Под този термин се разбира явление, възникващо при взаимодействие на слухови сигнали, при което чувствителността към някои звуци е различна за сметка на други. Маскирането се състои именно в това – при определени условия даден звук може да маскира друг, да го направи нечуваем. Обемът на настоящата статия не позволява този феномен да бъде разгледан в необходимата дълбочина и детайл, но все пак трябва да се споменат основните аспекти на маскирането. Съществуват четири основни направления на маскиране, сред които едновременно моноаурално маскиране, времево маскиране (неедновременно, напред и назад), централно (бинаурално маскиране) и бинаурално демаскиране (т.н. коктейл парти ефект). На всички тях ще бъде посветена следващата част от поредицата статии за човешката слухова система.

В реална ситуация непосредствени наблюдения върху възприятията за гръмкост и ефекта на маскиране могат да се реализират при неизкушени, интуитивно реагиращи индивиди – деца. В описаното от П. Стефанова музикално ателие, чиято основна задача е озвучаване на литературен текст и създаване на музикална приказка, децата извършват звукова илюстрация на героите и събитията в приказката. Ясно е подчертана необходимостта от индивидуални решения на всеки от участниците, които са съобразени с гръмкостта и интензивността на звуците от всички останали. „В изпълнението е важно всеки от героите да се включи навреме; да следи четеца и диригентския жест на детето, което “рисува” звуковите картини; да оживи образа, който пресъздава с артистично изпълнение; да слуша останалите изпълнители и колкото по-успешно те се превъплътят в образите, които пресъздават, толкова по-истинско и живо изпълнение ще се реализира“ (Стефанова, П., 2014).

Живата музикална практика представлява окончателния съдник за пригодност, целесъобразност и основателност на всяко знание и твърдение. Слуховите качества и особености на човек съществуват и функционират съвършено както преди, така и след тяхното детайлно описване и изучаване. По-важно е натрупаното познание да бъде въплътено в практическо приложение и да бъде от полза за формирането на качествени и ефективни инструменти, както и на компетентни музикално състоятелни подходи. Още в най-ранна възраст при музикалното образование може да се посочи пример за умело

вплитане на слуховата проблематика и съвместната музикална практика. „Ансамбловото свирене от своя страна представлява един аспект от музикалната практика, който поставя съвместното музициране на по-осъзнато равнище. Ползите от компетентното му прилагане са многостранни: чисто психологически, детето става част от един съвместен творчески акт, което носи радост, удовлетворение и възможност за съвместна изява. Така неусетно, в творческия процес се формират ценни музикални качества и възможност за комуникация“ (Стефанова, П., 2018).

REFERENCES

- Aldoshina, I., Pritts, R. (2006). *Musical acoustics*. Composer St Petersburg.
- 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.
- Howard, D., Angus, J. (2009). *Acoustics and Psychoacoustics*. Focal Press.
- Meyer, J. (2009). *Acoustics and the Performance of Music*. Springer Science+Business Media, LLC.