

КОЛЬЦОВА ОЛЕКСАНДРА

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку
Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут радіо і телебачення»
e-mail: otdel.13r@gmail.com

ХІВРЕНКО РУСЛАН

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку
e-mail: ruslan_energomir@ukr.net

ГРАЧОВ АРТУР

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку
e-mail: artur.grachov75@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТОТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СЛУХУ В ПРОЦЕСІ ВИМІРЮВАННЯ ГУЧНОСТІ ЗВУЧАННЯ АУДІОКОНТЕНТУ

В роботі наведено результати досліджень щодо сприйняття гучності звучання аудіоконтенту програм мовлення з урахуванням неоднакової чутливості слухової системи людини до різних частот звукового діапазону з метою можливого удосконалення алгоритму вимірювання гучності, описаного в Рекомендації ITU-R BS.1770-5. Наведено стислий огляд існуючих представлень частотної характеристики чутливості слуху при прослуховуванні різних типів звукових сигналів, а також описано результати суб'єктивно-статистичних експертиз для визначення помітності змін гучності звучання аудіоконтенту різних жанрів під час зміни рівня звукового сигналу в області верхніх частот звукового діапазону.

Ключові слова: гучність звучання, аудіоконтент, чутливість слуху, звуковий діапазон, суб'єктивно-статистичні експертизи.

KOLTSOVA OLEKSANDRA

State University of Intellectual Technologies and Communications
State Enterprise "Ukrainian Scientific Research Institute of Radio and Television"

KHIVRENKO RUSLAN, GRACHOV ARTUR

State University of Intellectual Technologies and Communications

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF HEARING IN THE PROCESS OF MEASURING THE AUDIOCONTENT LOUDNESS

Nowadays the problem of correct estimation and measurement of TV- and sound broadcasting programmes loudness is of great importance. The European Broadcasting Union (EBU) has established a special investigation group, dealing with loudness estimation and normalization, similarly, ITU emphasizes on the importance of objective measurement of audio program loudness to facilitate program delivery and exchange, and to provide more comfortable listening experience for audiences. In Recommendation ITU-R BS.1770-5 the modern algorithm of objective loudness measurement is described in detail. This algorithm includes frequency weighting of the measured audio signal to assume frequency properties of human auditory system, but such weighting concerns only the lower part of sound frequency band. In this article, the authors raise the question of the necessity of taking into account the dependence of sensitivity of the human auditory system on upper frequencies of the sound band. A brief overview of the existing representations of the frequency response of hearing sensitivity when listening to different types of sound signals is provided. Also in the article are discussed the results of subjective assessment of appreciability of changes in loudness of audio content of different types (speech and music) while changing the audio signal's level on the upper frequencies of sound band. In one case the level of audio signal was adjusted according to the equal loudness contour corresponding to 60 phons of loudness level, and in another case, according to one of the variants of the averaged psychometric curve. The results of subjective assessment for these two cases were compared with each other.

For all processed sound fragments, a confidence intervals were calculated based on the indicator of appreciability of changes in loudness, perceived by the listeners, and evaluated the accuracy of the results.

Based on the results obtained from subjective assessment, further ways of conducting of the research are proposed.

Keywords: sound loudness, audio content, sensitivity of the human auditory system, sound band, subjective assessment.

Постановка проблеми

У сучасному алгоритмі об'єктивного вимірювання гучності, запропонованому у Рекомендації МСЕ-R BS.1770-5 [1] у якості єдиного для цілей регулювання гучності під час обміну програмами, на першому етапі виконується двоступінчаста попередня фільтрація вимірюваного звукового сигналу.

Перший ступінь попередньої фільтрації забезпечує урахування акустичного впливу голови слухача, на другому ступені фільтра застосовується простий фільтр верхніх частот [1], АЧХ якого надано на рис. 1.

Цей фільтр вищих частот другого порядку із зважуванням за В-кривою з корекцією по нижнім частотам. В даному випадку він використовується для реалізації одного з можливих варіантів методу вимірювань еквівалентного рівня звукового тиску (Leq) із спектральним зважуванням. В результаті обробки цим фільтром частотні компоненти аудіосигналу стають адекватними їх слуховому сприйняттю. Частотна характеристика фільтра RLB (revised low-frequency B-curve) зображена на рис. 1 [1].

Але на рис. 1 видно, що зважувальна крива враховує тільки зміну слухового сприйняття на низьких частотах, а на середніх та високих частотах на другому етапі попередньої фільтрації зважування не виконують. Однак за результатами численних досліджень відомо, що чутливість слуху в області середніх та високих частот звукового діапазону має сильно виражену частотну залежність.

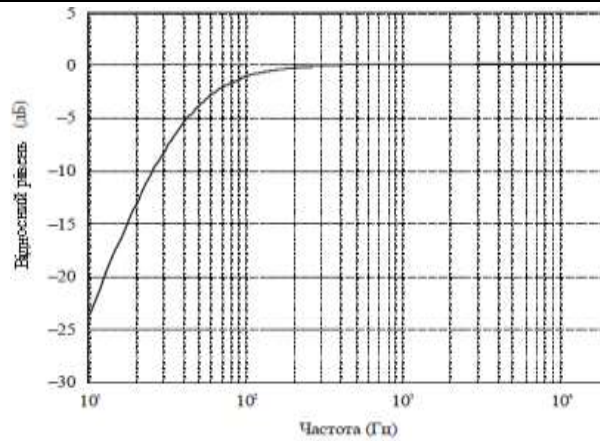


Рис. 1. Зважуюча крива RLB другого етапу попередньої фільтрації у алгоритмі вимірювання гучності у Рекомендації МСЕ-R BS.1770-5

Аналіз досліджень та публікацій

Досліджено, що найбільша чутливість слуху відзначається в околицях частоти 3500 Гц, у цій області знаходиться резонансна частота слухового проходу вуха (рис. 2) [2].

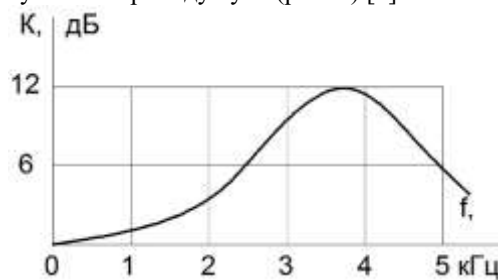


Рис. 2. Амплітудно-частотна характеристика слухового проходу вуха

Також залежність чутливості слуху від частоти виражено відомими кривими рівної гучності (ізофонами). На рис. 3 надано стандартні криві рівної гучності, які було отримано при прослуховуванні чистих тонів через гучномовець [3]. Такі криві використовують для визначення рівня гучності тональних сигналів на різних частотах звукового діапазону.

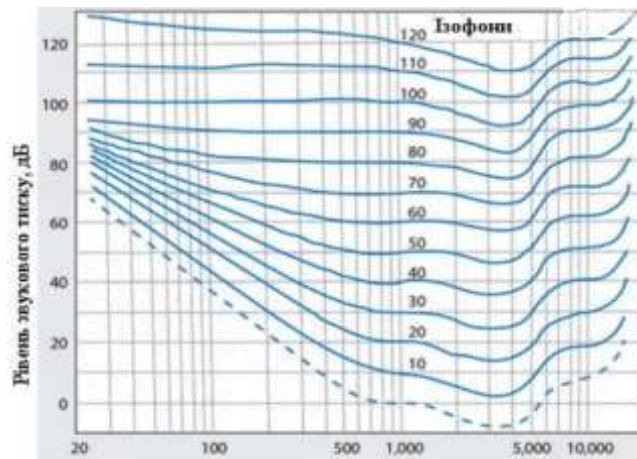


Рис. 3. Криві рівного рівня гучності (криві Флетчера-Мансона)

Самі криві показують рівні сигналів різних частот, що створюють у людини враження однакової гучності. З рис. 3 видно, що в області низьких і верхніх звукових частот чутливість вуха падає, і для створення враження тієї ж гучності потрібні вищі звукові тиски, ніж в області середніх звукових частот. Крім того, чутливість вуха змінюється залежно від гучності звучання. При зменшенні гучності звучання вуха стає менш чутливим до найнижчих і найвищих звукових частот. Тому зниження гучності відтворення супроводжується відчуттям зменшення діапазону відтворюваних частот, і суб'єктивна якість звучання погіршується [3]. Для зменшення цього неприємного ефекту при малих рівнях гучності штучно піднімають рівень відтворення найнижчих і найвищих звукових частот (тонкомпенсація), тобто підкреслюють крайні звукові частоти.

Сімейство кривих рівної гучності (ізофонів) можна розглядати як сукупність частотних характеристик слухової системи, виміряних на її виході.

На практиці також усереднену залежність чутливості вуха від частоти звукових коливань представляють за допомогою психофотричної кривої [4]. Один із варіантів такої усередненої кривої показано на рис. 4.

Цю криву можна з достатньою точністю апроксимувати функцією:

$$L = 3,55 \frac{F}{F_{\text{оп}}} e^{-\frac{F}{F_{\text{оп}}}} \quad (1)$$

де L – відносна чутливість вуха (відносно його чутливості на частоті 1 кГц);

F – значення вимірюваної частоти звукових коливань;

$F_{\text{оп}}$ – опорна частота, що дорівнює 2,22 кГц.

Апроксимація згідно (1) показана у вигляді графіку на рис. 4.

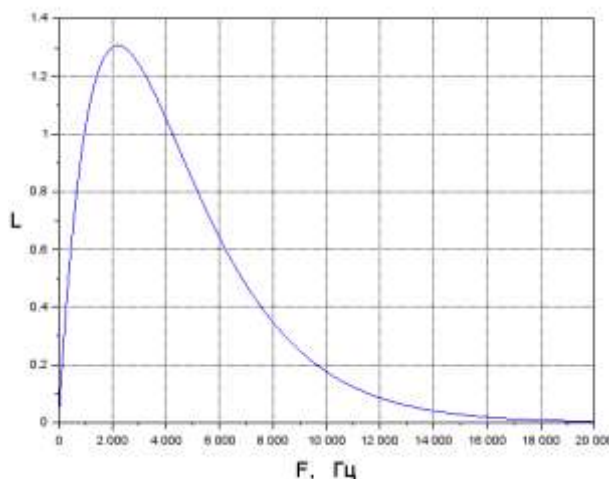


Рис.4. Психофотрична крива

Використання зважування звукового сигналу за частотою широко застосовується у практиці вимірювання і оцінювання шумів. На рис. 5 наведено найбільш широко вживані криві зважування [5], які рекомендовані для вимірювання шумоподібних звукових сигналів. Чи коректно використовувати їх для вимірювання гучності сигналів мовлення, які за своїми властивостями суттєво відрізняються від шумоподібних, потрібні додаткові дослідження.

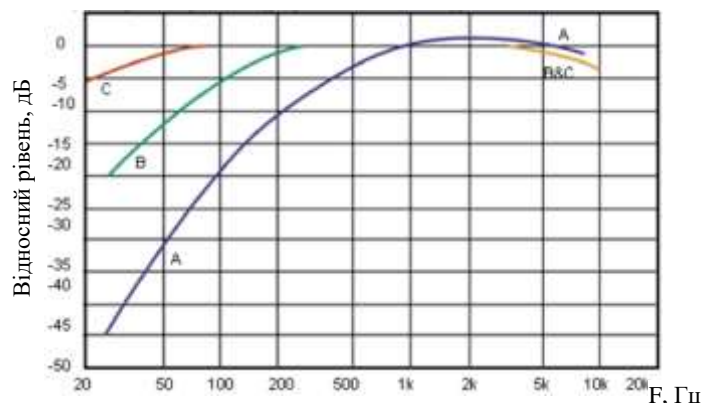


Рис.5. Криві зважування для вимірювання рівня шуму

Формулювання цілей статті

З урахуванням викладеного вище було проведено дослідження з метою визначення помітності зміння слухового сприйняття гучності при зміні рівня сигналу звукового мовлення в діапазоні середніх та високих частот.

Для того, щоб виконати відповідне дослідження було проведено експеримент, в рамках якого учасникам було запропоновано прослухати і порівняти оригінальні аудіофрагменти та фрагменти, в яких були зміни рівня у частотній області. Ці зміни виконувалися в області середніх та високих частот шляхом проведення певних типів обробки сигналу – відповідно до однієї з кривих рівної гучності Флетчера-Мансона із рівнем гучності 60 фон (рис. 3), та психофотричної кривої (рис. 4). На основі результатів дослідження ми отримаємо попередні оцінки та висновки щодо необхідності врахування чутливості слуху на високих частотах під час вимірювання гучності сигналів радіомовлення та звукового супроводу телебачення.

Виклад основного матеріалу. Порядок проведення експерименту

Для проведення експерименту було залучено групу із 20 слухачів віком від 18 до 25 років. У якості тестового звукового матеріалу використовувалися два музичні фрагменти (джазової та рок-музики) та

фрагмент дикторської мови. Як згадувалося вище, первинні фрагменти порівнювалися із відповідно зміненими фрагментами в області середніх та високих звукових частот. Зміни виконувалися відповідно до психофотметричної кривої (рис. 4) та однієї з кривих рівної гучності (рис. 3). З кривих рівної гучності використовувалася крива, відповідна 60 фон (як така, що представляє середнє значення рівня гучності із представленого діапазону для кривих на рис. 3).

Графіки, що представляють яким чином під час експерименту змінювався рівень сигналу на вищих частотах відносно 1 кГц, надані на рис. 5. Корегування рівня звукових сигналів виконувалося за допомогою редактора Sound Forge.

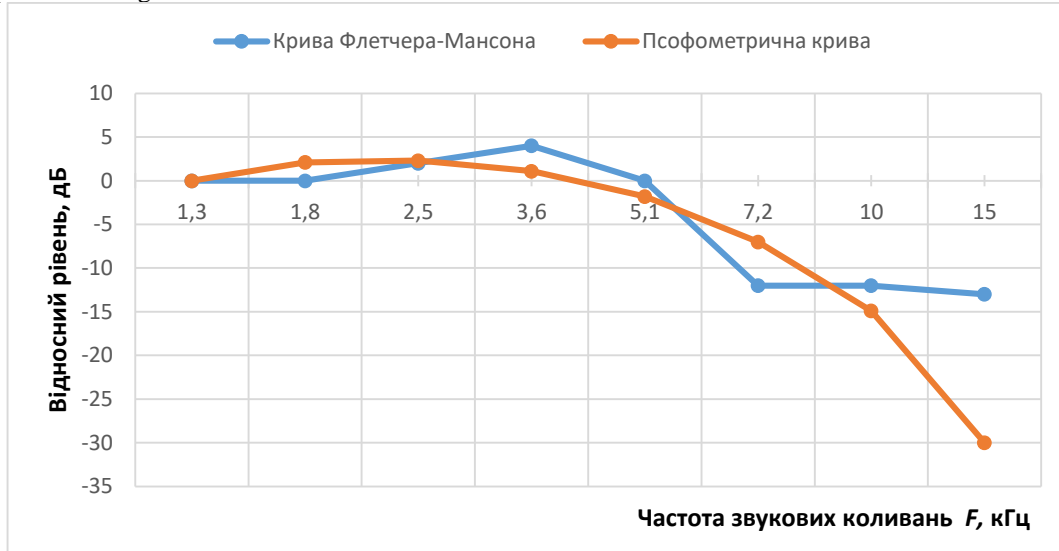


Рис. 6. Графік частотної залежності чутливості слуху в області середніх та високих частот відповідно до кривих Флетчера-Мансона (рівної гучності) та психофотметричної кривої

Результати помітності зміни гучності для різних фрагментів зведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Результати щодо помітності зміни гучності звукових сигналів різних жанрів за зміни рівня сигналу в області середніх та верхніх звукових частот

Тип звукового сигналу	Помітність зміни гучності, %	
	Відповідно до кривої рівної гучності 60 фон	Психофотметричної кривої
Мова диктора	70	80
Джаз	90	70
Рок-музика	90	60

Математичне трактування результатів експерименту

На основі отриманих результатів дослідження здійснювалося їх математичне трактування у вигляді визначення довірчих інтервалів. Визначення проводилося у відповідності до методики, наведеної у роботах [6, 7], у яких розглядаються питання обробки результатів суб'єктивно-статистичних експертиз щодо помітності спотворень звукових сигналів.

Під час проведення експериментів із різними величинами змін сигналу істинні значення помітності, або, що точніше, ймовірності помітити зміну гучності набуватимуть усіх значень від 0 до 1 (від 0% до 100%) залежно від величини зміни аудіосигналу. Оскільки для даної методики приймається, що закон розподілу величин помітності зміни гучності при певному змінненні рівня аудіосигналу p_i нормальний [6, 7], можна визначити точність отриманих результатів.

Маючи дані щодо помітності зміни гучності з таблиці 1 і знаючи, скільки слухачів брало участь в експерименті, можна побудувати інтервал, у який із заданою ймовірністю потраплятимуть значення помітності зміни гучності, якби ми стали повторювати експеримент знову.

Визначення довірчого інтервалу проводиться таким чином [6]. За отриманим значенням помітності для даної величини зміни визначаємо величину $S_{\bar{x}}$, яка в теоретичному розподілі відповідає дисперсії помітності

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}, \tag{2}$$

де

$$S = \frac{p_i(1 - p_i)n}{n - 1}. \tag{3}$$

Оскільки $n \gg 1$, то можна вважати, що $\frac{n}{n - 1} \approx 1$ і тоді $S = \sqrt{p_i(1 - p_i)}$.

Нормоване відхилення величини помітності буде визначатися як:

$$t = \frac{p_i - p}{S_{\bar{x}}} \quad (4)$$

Тут p є істинне значення помітності зміння гучності, яке ми шукаємо.

Ймовірність того, що це значення нормованого відхилення лежить в заданому інтервалі $t_1 < t < t_2$ дорівнює $p(t_1 < t < t_2) = \int_{t_1}^{t_2} S(t, k) dt$. У даному випадку $S(t, k)$ означає функцію від величин t і $k = n - 1$; $S(t, k)$ – функція розподілу величини t [6].

Задамо певну ймовірність α і знайдемо такий інтервал $-t_\alpha < t < +t_\alpha$, що ймовірність того, що t знаходиться в цьому інтервалі, дорівнює α

$$\bar{p}(-t_\alpha < t < +t_\alpha) = \int_{-t_\alpha}^{t_\alpha} S(t, k) dt = 2 \int_0^{t_\alpha} S(t, k) dt = \alpha \quad (11)$$

Таблиця значень t_α , визначених у (11), наведено у довідковій літературі [6, 7]. Задамося величиною α і по таблиці знайдемо відповідне t . Це означає, що з вірогідністю α нормоване відхилення помітності лежить в інтервалі $-t_\alpha < t < t_\alpha$, або

$$-t_\alpha < \frac{p_i - p}{S_{\bar{x}}} < t_\alpha \quad (12)$$

Звідси випливає, що із заданою вірогідністю α :

$$-t_\alpha S_{\bar{x}} < p_i - p < t_\alpha S_{\bar{x}}, \quad (13)$$

або

$$p_i - t_\alpha S_{\bar{x}} < p < p_i + t_\alpha S_{\bar{x}} \quad (14)$$

Справжня величина помітності даного спотворення з вірогідністю α лежить у довірчому інтервалі

$$(p_i - \varepsilon) < p < (p_i + \varepsilon), \quad (15)$$

де $\varepsilon = t_\alpha S_{\bar{x}}$ – точність наближеної рівності значення p_i до істинного значення p [6].

Обчислення довірчих інтервалів виконаємо з вірогідністю $\alpha = 0,9$. Результати обчислень довірчих інтервалів за показниками помітності для кожного обробленого фрагменту аудіоматеріалу зведемо до таблиці 2.

Таблиця 2

Результати обчислення довірчого інтервалу за показником помітності зміни гучності для оброблених звукових фрагментів

Зміння рівня сигналу відповідно:	Помітність зміння гучності p_i	Кількість експертних показань n	$S =$		Нормоване відхилення t_α	Точність $\varepsilon = t_\alpha S_{\bar{x}}$
			$\sqrt{p_i(1-p_i)}$	Дисперсія $S_{\bar{x}} = S/\sqrt{n}$		
Джазова музика						
Крива Флетчера (середні та високі частоти)	0,9	20	0,3	0,067	1,73	0,115
Псофометрична крива	0,7	20	0,458	0,1	1,73	0,173
Рок-музика						
Крива Флетчера (середні та високі частоти)	0,9	20	0,3	0,067	1,73	0,115
Псофометрична крива	0,6	20	0,49	0,11	1,73	0,19
Мова диктора						
Крива Флетчера (середні та високі частоти)	0,7	20	0,458	0,1	1,73	0,173
Псофометрична крива	0,8	20	0,4	0,089	1,73	0,154

Відповідно до описаної методики були оброблені дані проведених експертиз щодо дослідження помітності зміння гучності за умови змінень рівня звукових сигналів різних жанрів.

Розрахунки довірчих інтервалів показали, що точність результатів визначення помітної зміни гучності звучання за умови, що достовірність $\alpha = 0,9$, є такою:

- Під час зміни рівня звукового сигналу відповідно до кривої рівної гучності 60 фон:
 - джазова музика $\pm 11,5$ %;
 - рок-музика $\pm 11,5$ %;
 - мова диктора $\pm 17,3$ %.
- Під час зміни рівня звукового сигналу відповідно до псофометричної кривої (рис. 4):
 - джазова музика $\pm 17,3$ %;
 - рок-музика ± 19 %;
 - мова диктора $\pm 15,4$ %.

Як бачимо, в декількох випадках отримані значення точності є недостатніми для практичних цілей, тому можна сказати, що кількість опитуваних учасників експерименту має бути збільшена.

Висновки

У роботі описано проведене експериментальне дослідження щодо помітності зміни гучності звучання аудіоконтенту при зміні рівня досліджуваного звукового сигналу на високих частотах та його результати. Це дослідження проводилося в рамках дослідницької роботи, метою якої є отримання відповіді на питання – якою саме має бути характеристика зважувального фільтра другого ступеня у вимірювачах гучності на частотах вище 1 кГц.

Таке питання виникло внаслідок порівняння характеристики зважувального фільтра, наведеної у Рекомендації МСЕ-R BS.1770-5 для використання у сучасному алгоритмі об'єктивного вимірювання гучності, та відомих результатів щодо опису чутливості слуху людини у вигляді відповідних кривих, які використовуються у методах вимірювань та оцінок звукових сигналів для різних практичних задач. Тут варто зауважити, що багато з таких кривих було отримано або для тональних або шумоподібних сигналів, тому можна припустити, що за використання у якості випробувальних сигналів звукового мовлення, які можуть містити як тональні так і шумоподібні компоненти, результати щодо вигляду таких кривих чутливості можуть бути дещо відмінними.

З такої точки зору доцільним є розгляд психофотричної кривої, яка використовувалася також і для оцінки каналів радіомовлення [4].

В роботі порівнювалися результати щодо помітності зміни гучності звучання аудіоконтенту за умови зміни рівня сигналу на частотах вище 1 кГц згідно ходу кривої рівної гучності для 60 фон та психофотричної кривої.

В ході експерименту було використано мовний та два типи музичних сигнали. З таблиці 1 видно, що більш значне відчуття змін гучності спостерігається у музичних композиціях у випадку обробки сигналу згідно кривої рівної гучності. Обробка звукових сигналів за психофотричною кривою показала перевагу у помітності для мовного сигналу.

Під час порівняння між собою результатів для двох використаних методів обробки сигналу було виявлено, що помітність змін серед учасників експерименту за показником гучності складає більше 50% в обох випадках.

Але через те, що розрахована точність отриманих результатів в деяких випадках не можна вважати достатньою, є необхідність проведення подальших досліджень. Насамперед, потрібно збільшити кількість учасників експерименту для визначення помітності зміни гучності. Також на думку авторів слід включити до експерименту розгляд В-кривої зважування (рис. 5), як такої, на яку опиралися розробники алгоритму у [1] для зважування нижніх частот звукового діапазону.

Література

1 Recommendation ITU-R BS.1770-5 (11/2023). Algorithms to measure audio programme loudness and true-peak audio level. Electronic Publication. Geneva, 2023. Режим доступу: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1770-5-202311-I!!PDF-E.pdf.

2 Weber, P. C., & Khariwala, S. (2014). Anatomy and physiology of hearing. In *Bailey's Head and Neck Surgery: Otolaryngology* (Vol. 1-2, pp. 2253-2273). Wolters Kluwer Health.

3 Акустика слуху: конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 171 «Електроніка», освітньої програми «Акустичні електронні системи та технології обробки акустичної інформації» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: К. С. Дрозденко, О. І. Дрозденко.– Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 99 с.

4 Recommendation ITU-T O.41 (10/1994). Psophometer for use on telephone-type circuits. Electronic Publication. ITU 1995. Режим доступу: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=1702&lang=en>.

5 Frequency weighting equations. [Електронний ресурс]: Cross Spectrum. 2004. Режим доступу: <https://www.cross-spectrum.com/audio/weighting.html>.

6 Recommendation ITU-R BS.1284-2 (01/2019). General methods for the subjective assessment of sound quality. Electronic Publication. Geneva, 2019. Режим доступу: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1284-2-201901-I!!PDF-E.pdf.

7 Koltsova A.S. The investigation of the influence of audio signals transmission chain characteristics on the spatial properties of reproduced sound / Koltsova A.S., Borisov V.V. // Цифрові технології. – №23, 2018. – С. 82 – 88.

References

1 Recommendation ITU-R BS.1770-5 (11/2023). Algorithms to measure audio programme loudness and true-peak audio level. Electronic Publication. Geneva, 2023. Rezhim dostupu: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1770-5-202311-I!!PDF-E.pdf.

2 Weber, P. C., & Khariwala, S. (2014). Anatomy and physiology of hearing. In *Bailey's Head and Neck Surgery: Otolaryngology* (Vol. 1-2, pp. 2253-2273). Wolters Kluwer Health.

3 Akustyka slukhu: konspekt lektsiy [Elektronnyy resurs]: navch. posib. dlya stud. spetsial'nosti 171 «Elektronika», osvityannyi programy «Akustychni elektronni systemy ta tekhnolohiyi obrobky akustychnoyi informatsiyi» / KPI im. Ihorya Sikors'koho; ukl.: K. S. Drozdenko, O. I. Drozdenko. – Kyiv: KPI im. Ihorya Sikors'koho, 2020. – 99 s.

4 Recommendation ITU-T O.41 (10/1994). Psophometer for use on telephone-type circuits. Electronic Publication. ITU 1995. Rezhim dostupu: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?rec=1702&lang=en>.

5 Frequency weighting equations. [Elektronnyy resurs]: Cross Spectrum. 2004. Rezhim dostupu: <https://www.cross-spectrum.com/audio/weighting.html>.

6 Recommendation ITU-R BS.1284-2 (01/2019). General methods for the subjective assessment of sound quality. Electronic Publication. Geneva, 2019. Rezhim dostupu: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1284-2-201901-1!!PDF-E.pdf.

7 Koltsova A.S. The investigation of the influence of audio signals transmission chain characteristics on the spatial properties of reproduced sound / Koltsova A.S., Borisov V.V. // *Tsyfrovі tekhnolohiyi*. – №23, 2018. – s. 82 – 88.