

УДК 792.01: 778.534.4

DOI <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2025-01-09-02>

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗВУКОРЕЖИСЕРА ЩОДО СПРИЙНЯТТЯ ЗВУКОВИХ СИГНАЛІВ ОРГАНОМ СЛУХУ

Гребін О. П., к.т.н., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0003-4180-1720>, alexgstudio.2016@gmail.com

Левенець Н. Ф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0003-0984-7622>, n.levenets.ua@gmail.com

Продєус А. М., д.т.н., проф., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-7640-085>, ram51335-ames@iit.kpi.ua

Швайченко В. Б., к.т.н., доц., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-9736-0800>, vbs2011@ukr.net

Анотація. Метою роботи є розроблення досить простого способу обстеження слухових вад для працівників звукової індустрії, зокрема звукорежисерів. Дослідження має на меті не точне визначення вад слуху, а визначення необхідної корекції частотної характеристики звуковідтворення для якісного сприйняття звукового контенту. Методика дослідження ґрунтується на вимірюванні рівня гучності на порозі чутності й частотної характеристики сприйняття звукових сигналів на порозі чутності. Результати дослідження слухового сприйняття звукових сигналів одним із авторів і групи слухачів з 35 осіб для визначення вад слуху свідчать, що серед реальних 28 результатів відхилення від теоретичної кривої порогу чутності в межах 10...20 дБ у звуковому діапазоні, що вважають відсутністю вад слуху за медичними показниками, мали 20 осіб, більше ніж 20 дБ на окремих частотах звукового діапазону мали 7 осіб, а більше ніж 20 дБ у широких смугах частот – 1 особа, ці особливості обов'язково варто враховувати при відтворенні фонограм для якісного сприйняття. Дослідження слухового сприйняття одного з авторів запропонованим методом доводить, що форма частотної характеристики сприйняття звукових сигналів збігається за формою з теоретичною кривою однакової гучності на порозі чутності, однак на частотах максимальної чутливості слуху (2–4 кГц), чутливість слуху цієї особи значно погіршена, також сприйняття високих частот, починаючи вже з частоти 1 кГц, теж має вади. Наукова новизна полягає в удосконаленні методу визначення вад слуху осіб, яких долучено до визначення якості сприйняття аудіоконтенту. Практична цінність полягає в тому, що враховано звичну для звукорежисерів навколишню обстановку з усіма акустичними перевагами й недоліками, попереднє встановлення оптимальної гучності для сигналу та контенту, за яким «навчався» слухач, забезпечено можливість проведення досліджень у всьому частотному діапазоні сприйняття звуку людиною й у разі виявлення недоліків (вад) слуху більш детально визначено частоти, на яких проводиться вимірювання, причому завжди можна прослухати сигнал з достатньою гучністю й очікувати саме цей сигнал на порозі чутності. Також визначено вимоги до обладнання, які обов'язково варто враховувати під час відтворення фонограм для якісного сприйняття.

Ключові слова: аудіограма; вади слуху; звуковий контент; звукорежисер; мінімальний рівень; поріг чутності.

RESEARCH OF INDIVIDUAL PROPERTIES OF SOUND DESIGNERS IN RELATION TO THE PERCEPTION OF SOUND SIGNALS BY THE HEARING

Oleksandr Grebin, Ph.D., Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0003-4180-1720>, alexgstudio.2016@gmail.com

Ninel Levenets, Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0003-0984-7622>, n.levenets.ua@gmail.com

Arkadii Prodeus, D.Sc., Prof., Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0001-7640-0850>, ram51335-ames@iit.kpi.ua

Volodymyr Shvaichenko, Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems of the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0001-9736-0800>, vbs2011@ukr.net

Abstract. The aim of the research is to develop a fairly simple method for examining hearing impairments for workers in the audio industry, in particular audio engineers. The aim of the research is not to accurately determine hearing impairments, but to determine the necessary correction of the frequency response of

sound reproduction for high-quality perception of sound content. The research is based on measuring the loudness level at the threshold of hearing and the frequency response of the perception of sound signals at the threshold of hearing. A study of auditory perception of sound signals by one of the authors and a group of listeners of 35 people to determine hearing impairments shows that among the real 28 results, 20 people had deviations from the theoretical threshold curve of audibility within 10...20 dB in the sound range, which is considered the absence of hearing impairments according to medical indicators, 7 people had more than 20 dB at individual frequencies of the sound range, and 1 person had more than 20 dB in wide frequency bands. These features must be taken into account when reproducing phonograms for high-quality perception. The study of auditory perception by one of the authors using the proposed method proves that the shape of the frequency response of the perception of sound signals coincides in shape with the theoretical curve of the same loudness at the threshold of audibility, however, at the frequencies of maximum hearing sensitivity (2–4 kHz), the hearing sensitivity of this person is significantly impaired, and the perception of high frequencies, starting from a frequency of 1 kHz, also has defects. The method for determining hearing impairments of individuals involved in determining the quality of perception of audio content has been improved. The environment familiar to sound engineers with all its acoustic advantages and disadvantages has been taken into account, the optimal volume has been previously set, and for the signal and content by which the listener was "trained", the possibility of conducting research in the entire frequency range of human sound perception has been ensured, and when hearing deficiencies (defects) are detected, the frequencies at which measurements are performed have been determined in more detail, and it is always possible to listen to a signal with sufficient volume and expect this signal at the threshold of audibility. Equipment requirements have also been determined, which must be taken into account when reproducing phonograms for high-quality perception.

Key words: audiogram; hearing impairment; sound content; sound engineer; minimum level; threshold of hearing.

Вступ

Робота звукорежисера в будь-яких своїх проявах – це робота зі звуком, формуванням звукового контенту, звукових програм і завжди пов'язана з прослуховуванням звукового контенту. Якщо переглянути визначення звукорежисера – це працівник звукової індустрії, який здійснює виробництво звукового контенту як незалежного продукту, так і звукового супроводу для аудіовізуального контенту – телевізійних програм, кінофільмів тощо [1; 2].

Звукорежисер – один із провідних учасників творчого процесу, пов'язаного з формуванням звуку у відповідних видах і жанрах музичного мистецтва, є повноправним учасником творчого процесу формування не лише технічного, а й художнього складника звукового контенту. Звукорежисер визначає умови створення та кінцевий результат звукового образу, зафіксованого на носії звукозапису [3].

Звукорежисер керує всім процесом створення звукового контенту, створенням звукової картини загалом, відповідає за кінцевий результат створеного звукового матеріалу. Звукорежисер у процесі виробництва звукового контенту виконує такі операції зі звуком: установлює необхідне підсилення сигналу до оптимального рівня, забезпечує обробку сигналу за частотою, зокрема формує тембральне забарвлення, формує різноманітні ефекти у звучанні, наприклад, за рахунок затримок сигналу, зсув фази сигналу тощо. Усі ці ефекти та зміни в сигналі звукорежисер повинен чути.

Із поширенням якісного телебачення, радіомовлення, звукозапису, ураховуючи розмаїття музичних жанрів, радіофікації різноманітних майданчиків – від концертних залів до торговельних центрів тощо, суттєво розширено сферу діяльності звукорежисера, що робить його працю масовою й зумовлює подальшу диференціацію. Виникає необхідність у концертних, студійних, театральних, постпродакшн, власних звукорежисерів музичних груп, звукорежисерів торговельно-розважальних закладів тощо [4].

Звичайна робота звукоінженера або навіть звукотехніка в сучасному світі потребує й деяких здібностей звукорежисера, тобто творчого складника в роботі зі звуком. Багато вищих навчальних закладів стали готувати звукорежисерів, адже робота звукорежисера вимагає достатнього рівня знань технічної точки зору, знання звуку й основ його створення, знання акустики, знання технологічного обладнання тощо, бути музично освіченим, а головне, глибоко розуміти сутність процесу виробництва звукового контенту.

Основна особливість звукорежисера, що пов'язана з опрацюванням звукового контенту, є його спроможність слухати й чути звук у будь-якому прояві. Звукорежисер має вміти аналізувати звуковий контент, виділяти з нього корисний контент і завади, визначати спотворення звукового сигналу, неточності у відтворенні, відчувати простір звукового образу, зосереджуватися на окремих звуках, створюваних інструментами й іншими джерелами звуку, відчувати музичний баланс тощо – усе це формує професійний складник звукорежисера [5].

Щоб чути звук і коректно його сприймати, зрозуміло, звукорежисер має чути сигнали припустимо мінімальної гучності й у частотному діапазоні, визначеному природою, тобто бути повністю здоровим щодо сприйняття звуку слуховим органом. Звукорежисер з вадами слуху, зрозуміло, не зможе здійснювати якісне виробництво контенту, адже він буде налаштовувати звучання відповідно до свого сприйняття, що для здорового слухача може призводити до відчуття наявності дефектів у звучанні.

Робота звукорежисера переважно пов'язана з контролем звукового сигналу в акустичному просторі за допомогою гучномовців – звукових моніторів, причому рівень гучності, за яким відбувається прослуховування, становить 90–95 дБ (94 дБ – відповідає звуковому тиску в 1 Па). Часто для більш детального контролю звукового контенту застосовують навушники. Тому для визначення слухових властивостей звукорежисера важливо розуміти власне сприйняття звукового контенту в різних умовах.

Деякі звукорежисери, зокрема молодь, вважають, що їм не потрібне дослідження вад слуху, що їхнє сприйняття звукового контенту є досить досконалим. Разом із тим, слухаючи весь вільний час доби звуковий контент у навушниках з невизначеною гучністю, при цьому вважаючи свої навушники найякіснішими серед будь-яких інших, не завжди розуміють, що і як повинно звучати, головне, не враховують, що можуть утрачати слух. Але це не так. Слух – найважливіший інструмент звукорежисера, як музичний інструмент для музиканта – може з часом погіршувати свої властивості [6].

З часом слухові властивості людини, звукорежисера в тому числі, змінюються в бік погіршення. Діапазон частот, що сприймає людина, з віком звужується, високі частоти сприймаються гірше, ніжні частоти не дають щільності, дещо «розмазуються». На жаль, відновити слухові відчуття неможливо. Але можливо знати ці вади й урахувати їх при формуванні звукового контенту.

Для дослідження слухових властивостей людини в медичній практиці використовують метод аудіометрії, який дає змогу визначати спроможність людини сприймати звуки різного походження, зокрема тональні звуки у визначеній частині звукового частотного діапазону, і за результатами дослідження зазначати вади слуху. Після дослідження (обстеження) будують аудіограму як графічне відображення сприйняття звуків людиною [7]. Вимірювання аудіограми проводить у медичних закладах, що спеціалізуються на дослідженні слуху, лікар-отоларинголог, аудіолог. Важливо зазначити, що аудіометрія передусім передбачає визначення вад слуху людини, а не якості сприйняття, що необхідно для людей, професійною діяльністю яких є, наприклад, виробництво звукового контенту, тобто звукорежисерів. Саме в цьому полягає один із недоліків цього методу.

Основою для визначення гостроти слуху, тобто того, з чим порівнюють спроможність людини щодо сприйняття тональних звуків різної частоти на порозі чутності, є крива однакової гучності на порозі чутності [8].

Гостроту слуху досліджують методами повітряної та кісткової провідності зазвичай на частотах від 125 Гц до 8000 Гц та рівнем звуку до 120 дБ (повітряна провідність) і до 70 дБ (кісткова провідність).

Методика дослідження слуху, що проводить аудіолог, передбачає такі дії. Особу розміщують у заглушеній акустичній камері, а на слуховий орган (вуха) надягають закриті навушники. З генератора тестових сигналів, що входить до складу аудіометра, у навушники подають сигнали відповідних частот у діапазоні від 125 Гц до 8 кГц зі збільшенням гучності. У момент, коли піддослідний починає чути звук відповідної частоти, він натискає кнопку, а аудіолог відмічає значення рівня сигналу відповідної частоти. Потім аудіолог змінює частоту й знову спрямовує сигнал у навушники, змінюючи гучність. Таке дослідження проводять на всіх необхідних частотах. Після закінчення обстеження будується аудіограма для кожного вуха й обох вух одночасно, тобто проводять три «підходи» вимірювання.

Нормальною щодо сприйняття звуків різних частот на порозі чутності для людини вважають таку частотну характеристику, коли її форма відповідає приблизно кривій однакової гучності на порозі чутності з нерівномірністю в діапазоні 125...8000 Гц 25-30 дБ, з максимальною чутливістю на частотах 2–4 кГц [9].

Для здорової людини відмінностей не повинно бути або припускають відмінності до 25 дБ, що вважається нормальним слухом. Відмінність у 26–40 дБ вважають як ступінь із легкою втратою слуху, 41–55 дБ – проміжний ступінь утрати слуху, 56–70 дБ – важкий ступінь [10].

Переваги зазначеного методу аудіометрії – це стандартизована методика вимірювань, наявність спеціалізованої медичної техніки (приладів) з установленнями оптимальними параметрами для проведення дослідження, проведення досліджень через повітряну й кісткову провідності для уточнення результатів і більш точного виявлення вад слуху. Недоліком, зокрема, для звукорежисера, окрім необхідності проведення цього обстеження в спеціалізованому медичному центрі з використанням відповідного медичного обладнання й акустичної камери з роз'ясненнями спеціаліста-отоларинголога [11], є обмежений частотний діапазон, зазвичай визначений діапазоном від 125 Гц до 8 кГц, притаманний мові, хоча людина сприймає від 20 Гц до 20 кГц, вхідний тональний сигнал не завжди зрозумілий для слухача тобто він не завжди знає, що має чути і яка приблизно гучність повинна бути порівняно з оптимальною. Для порівняння на рис. 1 наведено вигляд кривих однакової гучності (рис. 1, а) та аудіограми за повітряною провідністю (рис. 1, б) – суцільна крива.

Метою роботи є вдосконалення методу визначення вад слуху, який дасть змогу з мінімальними витратами самостійно визначати спроможність і якість сприйняття звукових сигналів у звуковому частотному діапазоні, причому у звичних для слухача умовах і при оптимальній (зручній) для прослуховування гучності. У разі виявлення вад сприйняття окремих частотних складників дати можливість корегувати гучність і частотну характеристику (далі – ЧХ) звуковідтворення у відповідних частотних смугах таким чином, щоб звуковий образ найкраще сприймався особами – слухачами режисованого звукового контенту, без вад слуху.

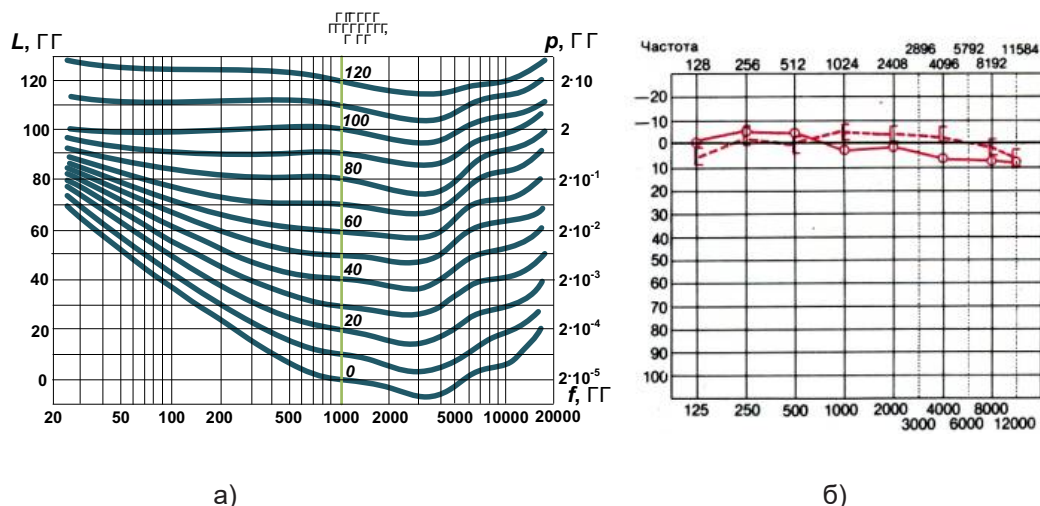


Рис. 1. Частотні характеристики: а) криві однакої гучності; б) аудіограма за повітряною провідністю (суцільна лінія) та за кістковою провідністю (штрихова лінія)

Виконання досліджень

Сутність пропонованого методу полягає в такому:

- 1) слухач, готуючись до дослідження, визначає тестові сигнали різного змісту, а саме шумові, музичні, тональні;
- 2) створюють комфортні умови дослідження щодо розташування відносно гучномовців і встановлюють доцільну гучність;
- 3) відтворюють тестові сигнали, гучність яких збільшують від нуля до номінального рівня за визначений проміжок часу, за допомогою вбудованого у спеціалізоване програмне забезпечення (далі – ПЗ) вимірювача рівня визначають рівень сигналу, при якому з'являється відчуття звукового контенту;
- 4) за результатами дослідження будують графік частотної характеристики сприйняття тональних звуків і порівнюють із теоретичною кривою однакої гучності на порозі чутності. Відхилення між кривими будуть сигналізувати щодо погіршення якості сприйняття звуків і наявності вад слуху.

Процедура визначення якості сприйняття звукового контенту пропонованим методом потребує наявності такого апаратного й програмного забезпечення:

- персональний комп'ютер (далі – ПК) зі спеціалізованим ПЗ для роботи зі звуком (необов'язково професійним), наприклад, Audacity, Sound Forge, Adobe Audition тощо, у якому є можливість синтезувати тональні звуки різних частот звукового діапазону й убудовано досить точний вимірювач рівня, наприклад, RPM типу;
- гучномовців, бажано з високими технічними параметрами, наприклад, звукові монітори або гучномовці Hi-Fi класу, а також навушники.

Як лабораторна робота для студентів у праці [12] описано метод дослідження слуху у звичайних умовах житлової кімнати або звукорежисерської апаратної.

Сам процес передбачає визначення рівня гучності сигналу, що відповідає порогу чутності в умовах відтворення, і ЧХ сприйняття звуку. Значення рівня сигналу, за яким визначено поріг чутності, у дослідженні встановлюють за значенням рівня електричного сигналу, що відображено на вбудованих у ПЗ індикаторах рівня, зокрема індикаторі RPPM. Потім за значеннями електричних рівнів будують криву ЧХ сприйняття, форму якої порівнюють із формою кривих однакої гучності.

Структурну схему підключення обладнання й умови проведення обстеження наведено на рис. 2.

Для дослідження застосовано ПК з ПЗ для роботи зі звуком (Sound Forge [13]) і звичні для слухача пристрої звуковідтворення. Як джерело тестових сигналів застосовано генератор синусоїдних сигналів, убудований у ПЗ.

Перед початком обстеження на гучномовцях, якщо вони активні й мають регулятори тембру, положення регуляторів тембру встановлюють у «0», що відповідає відсутності корекції ЧХ. На підсилювачах потужності в разі застосування пасивних гучномовців регулятори тембру встановлюють у «0». У програмних регуляторах тембру ПК регулятори тембру теж виводять у «0».

Після цього на головний екран монітора ПК завантажують Sound Forge й досить якісний і зрозумілий для піддослідного музичний фрагмент, бажано з насиченим інструментальним супроводом (рис. 3). У режимі відтворення фрагменту встановлюють оптимальну гучність для слухача, що знаходиться на певній (зручній для комфортного прослуховування) відстані від гучномовців. Гучність установлюється регулятором гучності на гучномовцях або підсилювачі, а також віртуальним регулятором ПК.

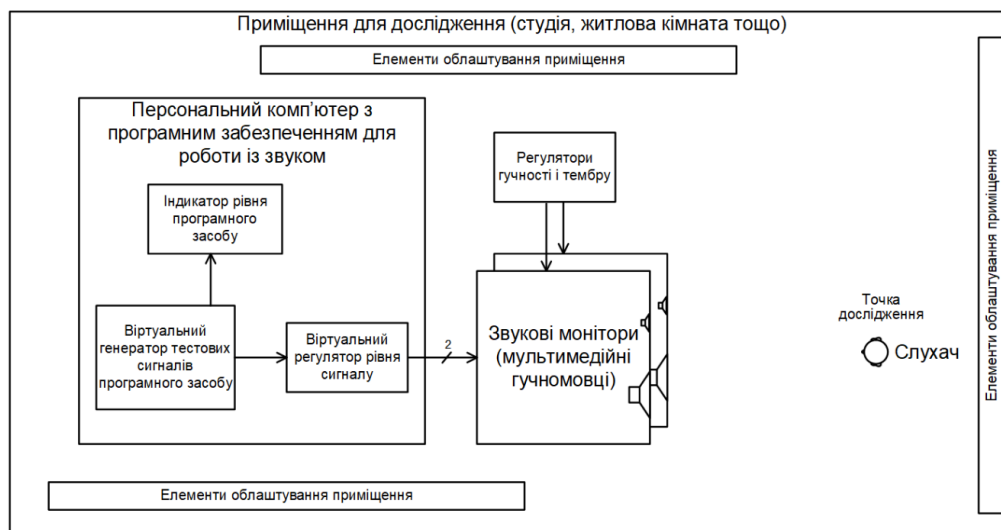


Рис. 2. Структура обладнання й умови проведення дослідження

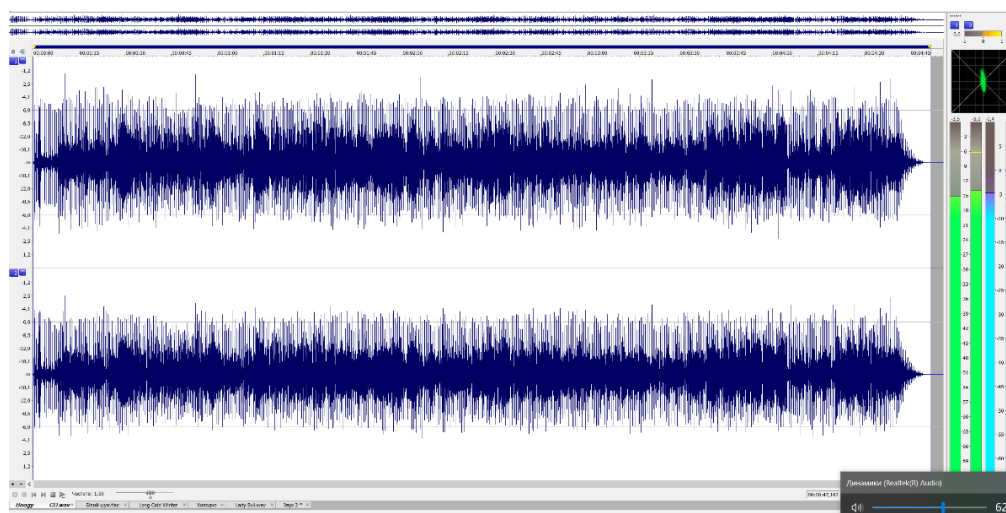


Рис. 3. Головне вікно ПЗ Sound Forge із завантаженим музичним фрагментом

Критерієм оптимальної гучності в контексті дослідження можна вважати, наприклад, гучність, яку встановлює пересічний слухач при комфортному прослуховуванні звукових програм у побутових умовах (з досвіду авторів, це приблизно 75–80 дБ), або гучність, що відповідає рівню, за якого звуко-режисер контролює звукові програми в студії, тобто 90–95 дБ.

Зрозуміло, що в побутових умовах визначати числове значення рівня не завжди можливо, адже пересічний слухач не володіє вимірювальним обладнанням для вимірювання рівня акустичного сигналу. Навпаки, звуко-режисер зазвичай має такі прилади або має завантажений у смартфон додаток, за допомогою якого можна вимірювати рівень звукового акустичного сигналу.

Одночасно з прослуховуванням фонограм в акустичному просторі приміщення можна за допомогою завантаженого в смартфон вимірювача рівня акустичного сигналу, наприклад, P3 Sound Meter [14], вимірювати оптимальний рівень прослуховування в місці прослуховування (обстеження), а також спектр відтвореного звукового музичного сигналу за допомогою додатка в смартфоні, наприклад, P3 RTA Analyzer [15]. У разі вимкнення відтворення фонограм вимірюють рівень сторонніх шумів у приміщенні, у якому здійснюють дослідження.

Після встановлення оптимального рівня гучності для музичної програми завантажують у програмний засіб сигнал білого шуму як сигнал із широким частотним спектром, з рівнем -20 дБ, тривалістю 600 с (10 хв. – максимально програмований час тестових сигналів у Sound Forge) і, увімкнувши відтворення, прослуховують звучання білого шуму в гучномовцях, усвідомлюючи (запам'ятовуючи) його звучання.

Ця тривалість фрагменту необхідна для створення більш плавного збільшення гучності сигналу й, відповідно, більш точного встановлення значення рівня сигналу на порозі чутності. Можна брати

тривалість фрагмента 1 хв., але максимальний рівень установлювати менше, наприклад, -40 дБ. Якщо меж рівня буде недостатньо для визначення рівня порогу чутності або, навпаки, важко буде визначити рівень сприйняття, нормалізацією можна змінювати (збільшувати або зменшувати) максимальний рівень.

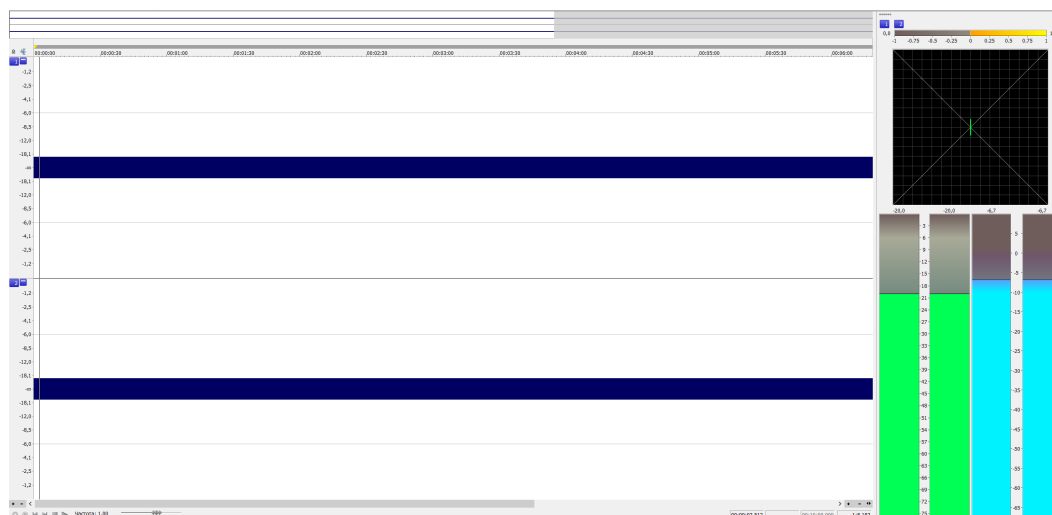
Послідовність операцій:

1. Файл – Створити – Нове вікно (частота дискретизації – 44100 Гц, квантування – 16 біт, 2 канали стерео).

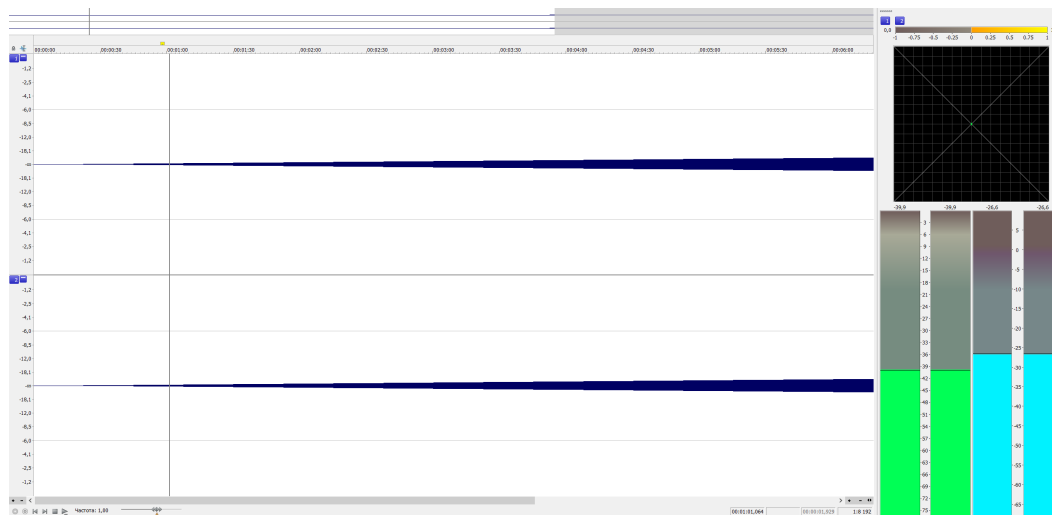
2. Insert (вставити) – Synthesis (синтезувати) – FM – білий шум (тривалість – 600 с, рівень – -20 дБ) (рис. 4, а).

За допомогою обробки сигналу, що передбачає плавне наростання гучності, установлюють наростання сигналу вздовж усього фрагменту.

Послідовність операцій: 1) Обробка – Згасання – Зростання (рис. 4, б).



а)



б)

Рис. 4. Головне вікно ПЗ Sound Forge: а) із завантаженням білим шумом без зміни рівня; б) зі зміною рівня й зупиненим курсором у місці відчуття сигналу на порозі чутності

Після цього необхідно ввімкнути відтворення з початку фонограми, вслуховуючись у звучання в гучномовцях. Як тільки сигнал буде достатньо чітко почутий, натиснути «пауза», у місці встановлення курсору ПЗ визначають рівень сигналу, який і буде відповідати рівню порогу чутності тестового сигналу, у цьому випадку білого шуму (рис. 4, б) для слухача.

Для спрощення визначення рівня сигналу при прослуховуванні й формування звіту дослідження можна на клавіатурі комп'ютера натискати клавішу PrtSc, роблячи тим самим скриншот (знімок) екрану. Потім цей знімок уставити в текстовий документ як підтвердження дослідження.

Після визначення рівня сприйняття білого шуму в ПЗ завантажують тестовий сигнал частотою 63 Гц, тривалістю 600 с, рівнем -20 дБ (або з меншою тривалістю й, відповідно, меншим рівнем, залежно від очікуваного результату відчутого рівня).

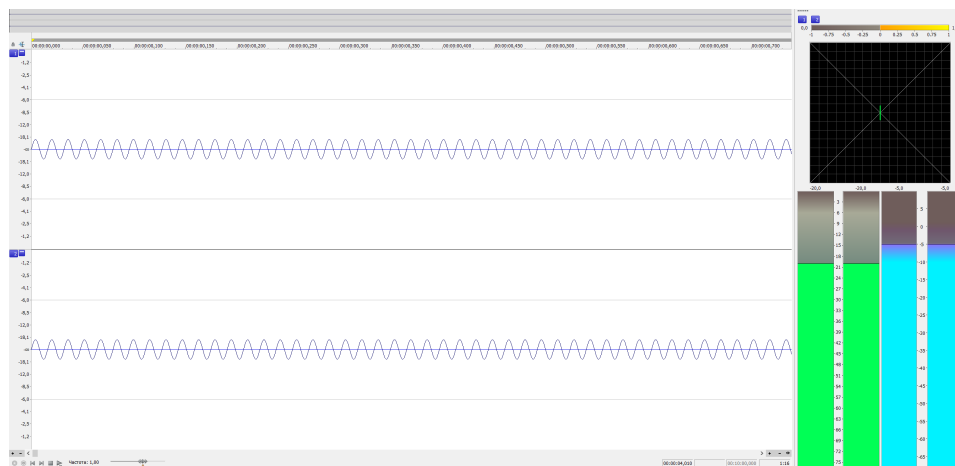
Послідовність операцій: 1) Файл – Створити – Нове вікно (частота дискретизації – 44100 Гц, квантування – 16 біт, 2 канали стерео).

2) Insert (вставити) – Synthesis (синтезувати) – Звичайна синусоїда (тривалість – 600 с, частота – 63 Гц, рівень – -20 дБ) (рис. 5, а).

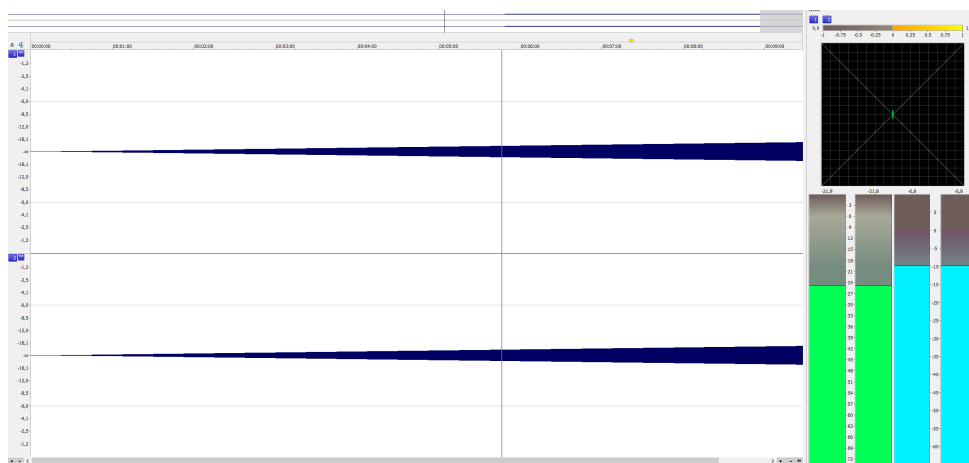
Знову, використовуючи обробку зростання рівня сигналу (послідовність операцій: 1) Обробка – Згасання – Зростання (рис. 5, б), формують сигнал для випробування. Після цього потрібно увімкнути відтворення сигналу й очікувати чітке відчуття його.

Таке дослідження проводять на всіх центральних частотах октавних смуг звукового діапазону (63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 Гц). Як варіант, можливо обирати проміжні частоти, наприклад, 80, 100, 400, 3000, 6000, 10000, 12000, 14000, 18000 Гц тощо.

Для кожної частоти вимірюють рівень сприйняття, складають таблицю рівня чутних сигналів і будують графік, який порівнюють із тестовою кривою однакової гучності. При виявленні вад у сприйнятті окремих частотних смуг звукорежисер має враховувати ці вади при встановленні параметрів формування звуку, особливо щодо тембрального забарвлення звучання. Дослідження необхідно проводити спочатку для одного вуха, закривши інше вушною вкладкою (берушено), потім для іншого й для двох відкритих вух.



а)



б)

Рис. 5. Головне вікно ПЗ Sound Forge: а) із завантаженням синусоїдним сигналом частотою 63 Гц без зміни рівня; б) зі зміною рівня й зупиненим курсором у місці відчуття сигналу на порозі чутності

Для кожної частоти вимірюють рівень сприйняття, складають таблицю рівня чутних сигналів і будують графік, який порівнюють із тестовою кривою однакової гучності. При виявленні вад у сприйнятті окремих частотних смуг звукорежисер має враховувати ці вади при встановленні параметрів

формування звуку, особливо щодо тембрального забарвлення звучання. Дослідження необхідно проводити спочатку для одного вуха, закривши інше вушною вкладкою (берушею), потім для іншого й для двох відкритих вух.

При застосуванні для вимірювання навушників початкові рівні сигналів у програмному засобі необхідно встановлювати в межах -30...-40 дБ. Для спостереження за формою сигналів необхідно виконувати масштабування не тільки в горизонтальній площині (праворуч + та -), а й у вертикальній (ліворуч + та -).

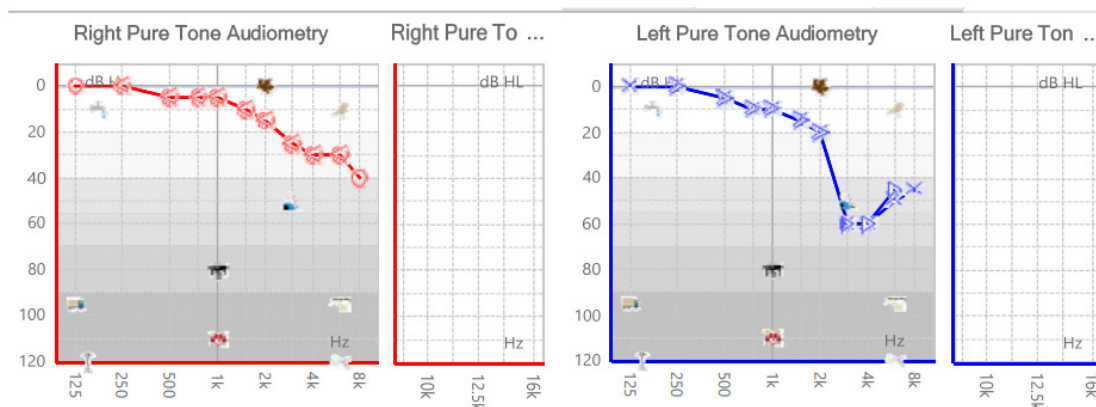
Порядок проведення передбачає відтворення тестових тональних сигналів з різною гучністю в реальних умовах прослуховування фонограм і визначення рівня гучності сигналу, при якому піддослідний цей сигнал сприймає, тобто починає чути. Значні відхилення від графіка будуть сигналізувати про вади слуху. Хоча окремі відхилення можуть бути визначені й недовіками відтворення в приміщенні, недосконалим низькоякісним обладнанням, наявністю сторонніх звуків тощо. Тому доцільно проводити оцінювання якості відтворюваного аудіоконтенту, зокрема як акустичного сигналу [16].

Натурний експеримент. Верифікацію зазначеного методу проведено порівнянням з аудіограмою на прикладі аналізу вад слуху 1 особи. Як приклад дослідження слухового сприйняття людиною звукових сигналів різних частот наведено дослідження, виконане одним із авторів у медичному центрі Беттертон у м. Києві [17]. Результати аудіограми подано на рис. 6.

Відповідно до висновку, слухач має порушення функції апарату звукосприйняття за сенсоневральним типом 1 ступеня. Нормою хорошого слуху є нерівномірність ЧХ сприйняття звукових сигналів тональних частот менше ніж 20 дБ. 1 ступінь порушення слуху говорить про те, що ЧХ звукосприйняття може бути від 20 дБ до 50 дБ. Праве вухо в слухача – на нижніх частотах, до 2 кГц у нормі, а на частотах вище за 2 кГц є порушення. Ці порушення можливо компенсувати підвищенням гучності сигналу, щоб він був почутий, наприклад, на частоті 8 кГц на 40 дБ, порівняно із сигналом частотою 250 Гц. Для лівого вуха існує ще більший «провал» у сприйнятті звукових тональних сигналів на частотах 3–4 кГц до 60 дБ. Тобто, щоб слухач почув ці сигнали, необхідно збільшити їх гучність на 60 дБ, порівняно з частотою 250 Гц.



а)



б)

Рис. 6. Графіки аудіограми для правого та лівого вух: а) головне вікно вимірювального приладу, б) скриншот паперового висновку

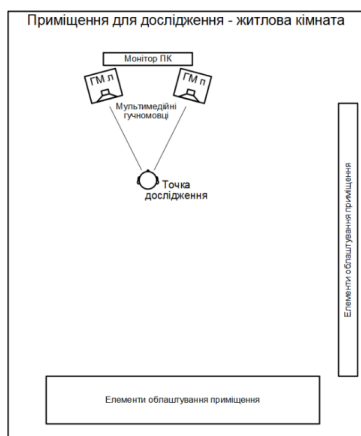
Дослідження слухового сприйняття звукових сигналів методом, запропонованим у статті, проведено в житловій кімнаті об'ємом приблизно 50 м³ з установленими елементами облаштування – м'якими та корпусними меблями, шторами на вікнах, телевизором, ПК тощо. Прослуховування тестових сигналів здійснено через стереофонічну систему мультимедійних гучномовців, установлених на робочому столі під монітором персонального комп'ютера. Відстань між гучномовцями – приблизно 50 см, відстань до слухача – приблизно 80 см (рис. 7, а).

Практичне дослідження проводили для двовушного прослуховування, тобто, на відміну від аудіограми, звуковий контент сприймався одночасно обома вухами. Як гучномовці застосовано мультимедійні гучномовці Edifier R1600T III Multimedia Speaker [18] (рис. 7, б).

Основні параметри гучномовців:

- номінальна електрична потужність кожного гучномовця – 30 Вт;
- відношення сигнал/шум – не менше ніж 85 дБА;
- нелінійні спотворення – не більше ніж 0,5%;
- частотний діапазон – 65...20000 Гц.

Гучномовці активні з можливістю регулювання гучності й тембру на НЧ та ВЧ.



а)

б)

Рис. 7. Особливості натурального експерименту: а) місце прослуховування для дослідження; б) загальний вигляд гучномовців

У кімнаті під час дослідження рівень сторонніх акустичних шумів становив приблизно 30 дБА. Вимірювання акустичних сигналів проведено вимірювачем Phonic PAA3, а також додатком до смартфона Sound Meter. Перед дослідженням регулятори тембру на гучномовцях установлені в середнє положення, що забезпечує відсутність налаштування ЧХ.

Налаштування на комфортну гучність здійснено за музичним твором групи Deep Purple «Smoke on the Water». Рівень акустичного сигналу в точці прослуховування становив приблизно 75–80 дБА. Головне вікно програми Sound Forge з відображенням сигналів музичного твору й рівня електричного сигналу наведено на рис. 8.

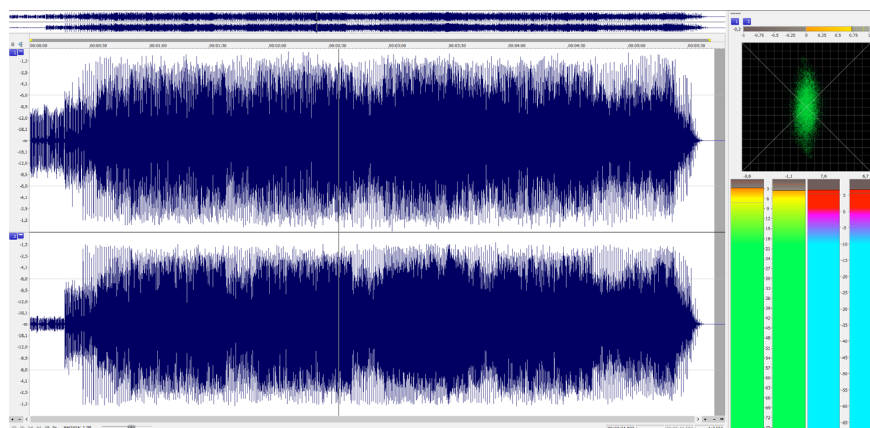


Рис. 8. Головне вікно програми Sound Forge із завантаженим музичним твором у режимі відтворення

Рівень електричного сигналу при встановлених умовах прослуховування – відповідному приміщенні й комфортній гучності – становить приблизно -58 дБ.

Після дослідження сприйняття білого шуму (рис. 9) досліджено сприйняття тональних сигналів різної частоти в діапазоні від 31,5 Гц до 16 кГц.

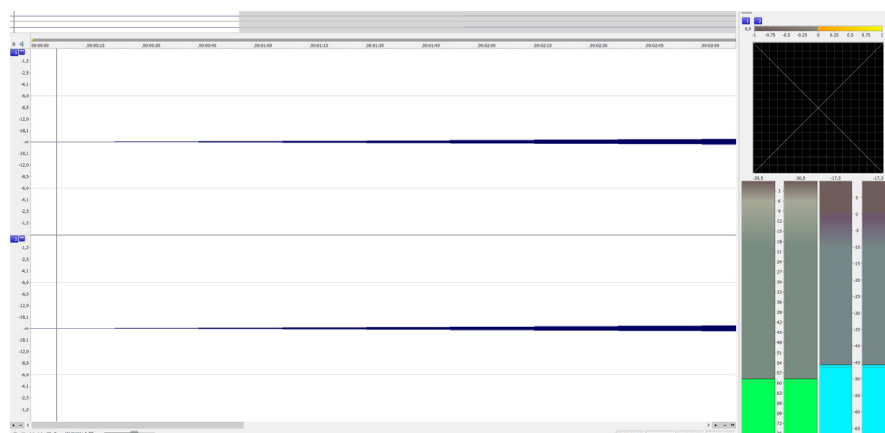


Рис. 9. Головне вікно програми Sound Forge із завантаженням тестовим сигналом білим шумом і визначеною точкою сприйняття звуку

Попередньо сигнали синтезовано вбудованим віртуальним генератором ПЗ, для них забезпечено необхідний часовий інтервал, збільшення гучності впродовж усієї тривалості сигналу та максимальну гучність, передбачену у фрагменті. Як приклад результатів дослідження наведено скриншоти результатів дослідження на частотах 63 Гц (рис. 10, а), 1000 Гц (рис. 10, б), 14000 Гц (рис. 10, в).

За результатами складено таблицю (див. таблицю 1) і побудовано графік частотної характеристики сприйняття сигналів на порозі чутності, який і порівнюють із кривою однакової гучності на порозі чутності (рис. 11).

Таблиця 1
Результати вимірювань ЧХ звукосприйняття на порозі чутності в умовах домашнього прослуховування

f , Гц	31,5	63	125	250	500	1к	2к	4к	8к	10к	12к	14к	16к
N , дБ	-11	-44	-63	-70	-75	-72	-64	-49	-31	-25	-27	-8	0

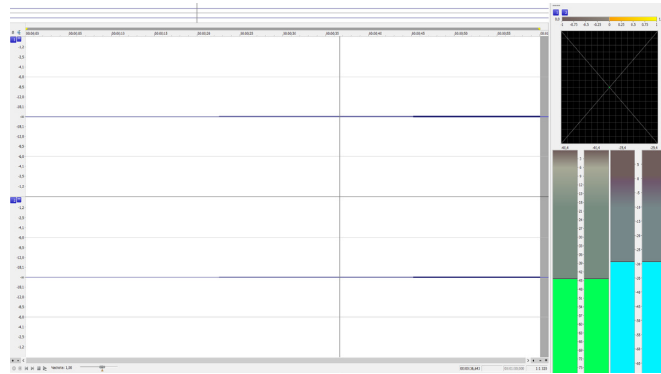
Рис. 11. Форма частотної характеристики сприйняття акустичних сигналів: крива світло-зеленого кольору – особою на порозі чутності, крива червоного кольору – особою за результатами дослідження, крива коричневого кольору – особою з явними вадами слуху, крива синього кольору – показів вимірювального приладу акустичних сигналів у точці прослуховування, крива темно-зеленого кольору – теоретичної кривої порогу чутності

Рівень електричного звукового сигналу в роботі звукорежисера визначають максимальним значенням у 0 дБ. Відповідність рівня акустичного сигналу електричному рівню визначають з урахуванням чутливості мікрофона, який акустичний сигнал перетворює в електричний, тобто електричний рівень щодо акустичного сигналу залежить від чутливості мікрофона. Цю залежність може бути визначено формулою:

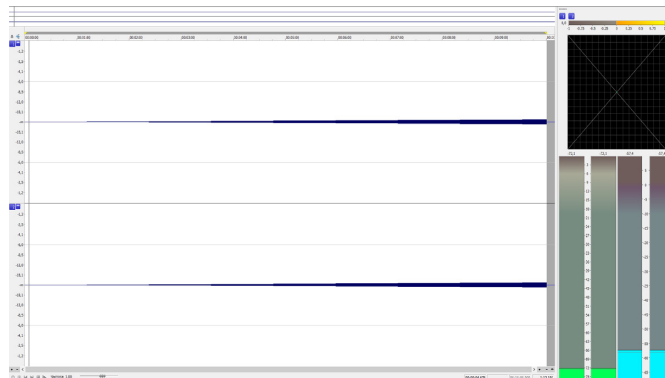
$$N_m = 20 \lg \frac{E_{oc} \cdot p_{зв}}{U_0} = 20 \lg \frac{E_{oc} \cdot p_0 \cdot 10^{\frac{L_p}{20}}}{0,775} = 20 \lg \frac{E_{oc} \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{\frac{L_p}{20}}}{0,775} =$$

$$= 20 \lg(2,58 \cdot 10^{-5} E_{oc} \cdot 10^{\frac{L_p}{20}}) \approx -92 + 20 \lg(E_{oc} \cdot 10^{\frac{L_p}{20}}),$$

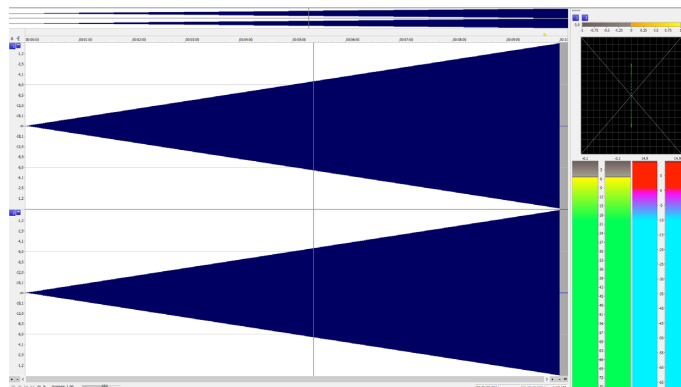
де N_m – рівень електричного сигналу на виході мікрофона; E_{oc} – осьова чутливість мікрофона або ЕРС на виході мікрофона при підведенні до нього на робочій осі акустичного сигналу відповідного звукового тиску; $p_{зв}$ – звуковий тиск; p_0 – звуковий тиск, що відповідає порозі чутності й нормоване значення звукового тиску, щодо якого визначають рівень акустичного сигналу; L_p – рівень акустичного сигналу за звуковим тиском.



а)



б)



в)

Рис. 10. Головне вікно програми Sound Forge із завантаженими тестовими сигналами та визначеними точкою сприйняття звуку на частотах: а) 63 Гц; б) 1000 Гц; в) 14 кГц

Рівень акустичного сигналу L_p , для якого рівень електричного сигналу дорівнює 0 дБ, визначають за формулою:

$$0 \approx -92 + 20 \lg E_{oc} \cdot 10^{\frac{L_p}{20}},$$

$$L_p = 20 \lg \frac{10^{\frac{92}{20}}}{E_{oc}} = 20 \lg \frac{10^{4,6}}{E_{oc}}. \quad (2)$$

За цією формулою, при вихідній напрузі (ЕРС) мікрофона $E=0,775$ В, що відповідає 0 дБ, рівень акустичного сигналу становить $L_p=94,2$ дБ ($p_{зв} = 1$ Па). З таким приблизно рівнем (від 90 до 95 дБ) зазвичай звукорежисер у студії прослуховує (контролює) звучання міксу звукового сигналу.

Отже, відповідність рівня електричного сигналу рівню акустичного сигналу має становити таке:

$$L_p = 94 \text{ дБ} \rightarrow N_m = 0 \text{ дБ}.$$

З огляду на те що рівень акустичного сигналу симфонічного оркестру у форте-фортисимо (максимальна гучність) становить приблизно 100 дБ, а також зазвичай на концертах рівень у зоні озвучення й, наприклад, для глядацької зали кінотеатру система озвучення повинна забезпечувати рівень 100 дБ, а максимальний неспотворений рівень електричного сигналу – 0 дБ, у роботі на рисунках графіків ЧХ й прийнята відповідність рівня акустичного сигналу 100 дБ саме рівню електричного сигналу 0 дБ, тобто:

$$L_p = 100 \text{ дБ} \rightarrow N_m = 0 \text{ дБ}.$$

За результатами оцінювання слухового сприйняття одним запропонованим методом можна зазначити, що форма ЧХ сприйняття звукових сигналів (рис. 11, а, червоного кольору) збігається за формою з теоретичною кривою однакової гучності на порозі чутності, однак на частотах максимальної чутливості слуху (2–4 кГц) чутливість піддослідного значно погіршена, також сприйняття сигналів частотою 8 кГц і 1 кГц для «ідеального» слуху за кривою однакової гучності повинна становити приблизно 5 дБ, а в особи, якій досліджували слух за цим методом, ця різниця становить 41 дБ.

Така різниця потребує значної корекції частотної характеристики відтворення сигналів. Якщо звукорежисер при таких вадах буде формувати відповідне тембральне забарвлення звучання фонограми, для здорового слухача в сприйнятті будуть завищені рівні високих частот. Отримані результати приблизно відповідають результатам аудіограми (рис. 6).

Способом, запропонованим у статті, досліджено сприйняття звукових сигналів на порозі чутності серед молоді – студентів майбутніх звукорежисерів (35 студентів, віком від 18 до 25 років). Дослідження особи проводили індивідуально відповідно до протоколу дослідження без залучення оператора або інших сторонніх осіб, тому можливі додаткові похибки результатів дослідження зумовлені суб'єктивним фактором.

Особливість перевірки слухових спроможностей для вибірки з групи молоді полягала в тому, що кожна особа мала змогу перевірити свої слухові властивості у власній житловій кімнаті, тобто в тому місці, де найчастіше здійснює прослуховування звукового контенту й із застосуванням власних засобів звуковідтворення. Побутові умови дослідження слухових властивостей дають можливість більше зосередитися на сигналі, що відтворюють, створює більш спокійну обстановку, хоча при цьому можливі побутові шуми. Але сторонні побутові шуми, навпаки, підвищують цінність дослідження, адже наближають слухові властивості до реальних умов прослуховування.

Вибірка становила групу з 25 чоловіків і 10 жінок. Серед поданих результатів дослідження результати, що відповідають реальним, становлять 28, а 7 досліджень за результатами не відповідають дійсним, серед яких і такі, що здійснювали дослідження з використанням низькоякісних гучномовців, убудованих у ноутбуки.

Реальні або дійсні результати характеризуються передусім відповідністю форми графіка ЧХ сприйняття тональних сигналів кривій однакової гучності на порозі чутності (рис. 11, б), по-друге, реальними умовами дослідження, зокрема вибором засобу прослуховування сигналів – достатньо якісними гучномовцями або навушниками, по-третє, вибором оптимальної гучності музичного сигналу перед початком дослідження при застосування гучномовців, що підтверджено вимірювачем рівня сигналу, убудованого як додаток у смартфоні.

Отримані ЧХ слухового сприйняття мають деякі відхилення на окремих частотах, але загалом повторюють криву однакової гучності. Приклади реальних ЧХ, отриманих у результаті дослідження, подано на рис. 11, б, приклади тих досліджень, що мають на окремих частотах значні відхилення від реальних ЧХ, – на рис. 11, в, результати дослідження, що не відповідають дійсності і є помилковими, що не враховувалися як позитивне дослідження, – на рис. 11, г. Як засіб прослуховування учасники дослідження обирали гучномовці: звукові монітори – 10 осіб; мультимедійні акустичні системи високої якості – 8 осіб; високоякісні повногабаритні навушники – 15 осіб; гучномовці, що вбудовані в ноутбуки, – 2 особи.

За результатами дослідження, серед реальних 28 результатів відхилення від теоретичної кривої порого чутності в межах 10...20 дБ у звуковому діапазоні, що вважають відсутністю вад слуху за медичними показниками, мали 20 осіб, більше ніж 20 дБ на окремих частотах звукового діапазону – 7 осіб, а більше ніж 20 дБ у широких смугах частот – одна особа. Графіки (форма кривої) частотних характеристик сприйняття тональних звуків практично збігаються з кривою однакової гучності (наприклад, для трьох осіб на рис. 11, б) і знаходяться в межах заштрихованої зони, у якій у більшості для піддослідних були отримані досліджувані криві (рис. 11, б). Відмінність визначено насамперед розташуванням кривої по вертикалі, що залежить від установлення початкової оптимальної гучності, за якої проводили дослідження.

Висновок

Запропоноване вдосконалення методу визначення вад слуху не можна вважати ідеальним і таким, що повністю відповідає вимогам за медичними показниками, але воно достатньо ефективне, адже дає змогу визначати вади слуху в комфортних зручних умовах.

Запропонований метод має на меті не точне визначення вад слуху, а визначення необхідної корекції частотної характеристики звуковідтворення для якісного сприйняття звукового контенту. Недоліки методу полягають у такому: по-перше, для дослідження бажано мати пристрій звуковідтворення з лінійною частотною характеристикою, що не завжди можна досягти, адже вимірювання здійснюються у власних кімнатах або студіях, де можуть бути недоліки акустичних умов приміщення, що призводить до нелінійності ЧХ звуковідтворення; по-друге, саме обладнання не завжди може забезпечувати лінійну частотну характеристику, ті ж гучномовці, адже навіть установа регулятора тембру в середнє положення, що відповідає лінійності ЧХ, не гарантує лінійну АЧХ звуковідтворення; по-третє, розшифрування отриманої аудіограми потребує деяких знань психоакустики. Крім того, психологічний стан слухача для підвищення своєї самооцінки може призвести до хибних показань, щоб не відчувати себе як людину з вадами слуху. Краще, щоб результати оцінював незалежний аудіолог.

Недоліком у виборі навушників для дослідження є неможливість визначення рівня сигналу, що відтворюють навушники, а перевагою – більш точне визначення сигналу на порозі чутності, адже не заважають зовнішні шумові фактори.

Перевага застосування гучномовців – реальний акустичний сигнал у навколишньому просторі приміщення, що вважають як більш натуральний щодо сприйняття звукового контенту, можливість визначення оптимальної гучності при прослуховуванні фонограм у місці прослуховування.

Переваги запропонованого вдосконалення методу – це звична для звукорежисера навколишня обстановка з усіма акустичними перевагами й недоліками, попереднє встановлення оптимальної гучності причому для сигналу й контенту, до якого звик слухач, можливість проведення досліджень у всьому частотному діапазоні прийняття звуку людиною, у разі виявлення недоліків (вад) слуху більш детально зазначати частоти, на яких проводиться вимірювання, причому завжди можна прослухати сигнал з достатньою гучністю й очікувати саме цей сигнал на порозі чутності. Дослідження проводять як в акустичному просторі приміщення, так і в індивідуальних навушниках.

Запропонований метод не дає результатів високої точності, але дає змогу проводити вимірювання в зручних і звичних для досліджуваного умовах, створює почуття розуміння сприйняття різних звуків, дає можливість порівнювати звучання тональних звуків із широкосмуговими (мовними, музичними), застосовує для вимірювання вимірювальні прилади програмних засобів ПК, є безкоштовним методом, дає змогу проводити дослідження в будь-який зручний для досліджуваного час тощо.

Подальший напрям роботи пов'язаний із визначенням припустимих похибок залежно від особливостей умов застосування запропонованого методу, визначення якості аудіоконтенту, який прослуховують, і застосування алгоритмів штучного інтелекту для узгодження результатів за запропонованим методом з особливостями аудіометрії.

Література

1. Основи звукорежисури : навчальний посібник / Н. Д. Белявіна, В. Ф. Белявін, Н. Л. Бондарець, В. В. Дьяченко ; під ред. Н. Д. Белявіної. Київ : НАККіМ, 2011. Ч. 1. 84 с. URL: <https://www.academia.edu/23244513/>.
2. Десятник Г. О., Бадіон С. В. Професія: звукорежисер : тексти лекцій. Київ : Інститут журналістики КНУ, 2019. 69 с. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://ktm.journ.knu.ua/wp-content/uploads/2020/02/Profesiia-zvukorezhyser-verstka-konvertirovan.pdf>.
3. Українська музична енциклопедія. Київ : Інститут мистецтвознавства фольклористики та етнології ім. М. Т. Рильського, 2008. Т. 2. 663 с. URL: https://shron3.chtyvo.org.ua/Skrypnyk_Hanna/Ukrainska_muzychna_entsyklopediia_Tom_2.pdf?PHPS ESSID=q1ri75ifinbcd1qrqnagblnmu0.
4. Pras A., Guastavino C. The role of music producers and sound engineers in the current recording context, as perceived by young professionals. *Musicae Scientiae*. 2011. № 15 (1). P. 73–95. <https://doi.org/10.1177/1029864910393407>.
5. Neuenfeldt K. Learning to Listen When There Is Too Much to Hear: Music Producing and Audio Engineering as “Engaged Hearing”. *Media International Australia, Incorporating Culture & Policy*. 2007. № 123. P. 150–160. URL: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.898978684851745>.
6. Porcello T. Speaking of Sound: Language and the Professionalization of Sound-Recording Engineers. *Social Studies of Science*. 2004. № 34 (5). P. 733–758. <https://doi.org/10.1177/0306312704047328>.
7. Guide for the Evaluation of Hearing Handicap. *JAMA*. 1979. № 241(19). P. 2055–2059. DOI: 10.1001/jama.1979.03290450053025.
8. Основи звукотехніки : навчальний посібник / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; укладачі : О. П. Гребінь, В. Б. Швайченко, Н. Ф. Левенець. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/55729>.
9. Profile analysis in listeners with normal and elevated audiometric thresholds: Behavioral and modeling results / Daniel R. Guest, David A. Cameron, Douglas M. Schwarz, U-Cheng Leong, Virginia M. Richards, Laurel H. Carney. *J. Acoust. Soc. Am.* 2024. № 156. P. 4303–4325. <https://doi.org/10.1121/10.0034635>.
10. Аудіометрія: своєчасна і точна діагностика слуху. URL: <https://lordoctor.dp.ua/uk/poslugi/diagnostika-slukha/audiometriya.html>.
11. Van Eeckhoutte M., Jasper B. S., Kjærboel E. F., Jordell D. H., Dau T. In-situ Audiometry Compared to Conventional Audiometry for Hearing Aid Fitting. *Trends in Hearing*. 2024. № 28. DOI: 10.1177/23312165241259704.
12. Архітектура акустика. Лабораторний практикум : навчальний посібник / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; укладачі: О. П. Гребінь, С. А. Луцьова, Н. Ф. Левенець. URL: <https://ela.kpi.ua/items/7813753c-5ce5-4e22-ac4c-ace3eace3e39>
13. SOUND FORGE Audio Studio. URL: <https://www.sony.com/electronics/support/downloads/00015797>.

14. Sound meter Pro. URL: <https://apps.microsoft.com/detail/9ntm0x0nwlfw?hl=uk-UA&gl=UA>.
15. RTA – Real Time Analyzer. URL: <https://studiosixdigital.com/audiotools-modules-2/acoustic-analysis-modules/rta/>.
16. Prodeus A., Didkovska M. Fourth Moment and Its Functional Transformations as Measures of Clipping Degree and Quality of Acoustic Signal. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2021. Vol. 64. № 5. P. 255–265. <https://doi.org/10.3103/S0735272721050046>.
17. Аудіометрія слуху. URL: <https://bettertone.com.ua/uk/service/audiometriya/>.
18. Мультимедійні гучномовці Edifier R1600T III Multimedia Speaker. URL: <https://edifier.com.ua/kolonki/stereo/r1600tii.html>.

References

1. Osnovy zvukorezhysury : navch. posib. CH. I [Fundamentals of sound engineering: a manual. Part I] / Byelyavina N. D., Byelyavin V. F., Bondarets' N. L., D'yachenko V. V.; edit. by. N. D. Byelyavina. Kyiv: NAKKKiM, 2011. 84 p. URL: <https://www.academia.edu/23244513/> [in Ukrainian].
2. Desyatnyk H. O., Badion S. V. Profesiya: zvukorezhysyer: teksty lektsiy. [Profession: sound engineer: lecture texts]. Kyiv: Instytut zhurnalistyky = Institute of Journalism KNU, 2019. 69 p. URL: <https://ktm.journ.knu.ua/wp-content/uploads/2020/02/Profesiia-zvukorezhysyer-verstka-konvertirovan.pdf> [in Ukrainian].
3. Ukrayins'ka muzychna entsyklopediya. T. 2 [Ukrainian Musical Encyclopedia. Vol. 2.] – Kyiv: Vydavnytstvo Instytutu mystetstvoznavstva fol'klorystyky ta etnolohiyi im. M. T. Ryl's'koho = Publishing House of the M. T. Rylsky Institute of Art History, Folklore and Ethnology, 2008. 663 p. URL: https://shron3.chtyvo.org.ua/Skrypnyk_Hanna/Ukrainska_muzychna_entsyklopediya_Tom_2.pdf?PHPSESSID=q1ri75ifnbc1qrnagblnm0 [in Ukrainian].
4. Pras, A., & Guastavino, C. (2011). The role of music producers and sound engineers in the current recording context, as perceived by young professionals. *Musicae Scientiae*, 15(1), 73–95. <https://doi.org/10.1177/1029864910393407>.
5. Neuenfeldt, K. (2007). Learning to Listen When There Is Too Much to Hear: Music Producing and Audio Engineering as “Engaged Hearing”. *Media International Australia, Incorporating Culture & Policy*, (123), 150–160. URL: <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.898978684851745>.
6. Porcello, T. (2004). Speaking of Sound: Language and the Professionalization of Sound-Recording Engineers. *Social Studies of Science*, 34(5), 733–758. <https://doi.org/10.1177/0306312704047328>.
7. Guide for the Evaluation of Hearing Handicap. *JAMA*. 1979;241(19):2055–2059. DOI: 10.1001/jama.1979.03290450053025.
8. Osnovy zvukotekhniki [Basics of sound engineering] : teaching aids / Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; compilers: O. P. Grebin, V. B. Shvaichenko, N. F. Levenets. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/55729> [in Ukrainian].
9. Profile analysis in listeners with normal and elevated audiometric thresholds: Behavioral and modeling results / Daniel R. Guest, David A. Cameron; Douglas M. Schwarz; U-Cheng Leong; Virginia M. Richards; Laurel H. Carney. *J. Acoust. Soc. Am.* 156, 4303–4325 (2024). <https://doi.org/10.1121/10.0034635>.
10. Аудіометрія: своєчасна і точна діагностика слуху. URL: <https://lorddoctor.dp.ua/uk/poslugi/diagnostika-slukha/audiometriya.html>.
11. Van Eeckhoutte M., Jasper B. S., Kjærboel E. F., Jordell D. H., Dau T. In-situ Audiometry Compared to Conventional Audiometry for Hearing Aid Fitting. *Trends in Hearing*. 2024;28. <https://doi.org/10.1177/23312165241259704>.
12. Arkhitekturna akustyka. Laboratornyy praktikum [Architectural Acoustics. Laboratory Workshop] : teaching aids / Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; compilers: O. P. Grebin, S. A. Lunyova, N. F. Levenets. URL: <https://ela.kpi.ua/items/7813753c-5ce5-4e22-ac4c-ace3eace3e39> [in Ukrainian].
13. SOUND FORGE Audio Studio. URL: <https://www.sony.com/electronics/support/downloads/00015797>.
14. Sound meter Pro. URL: <https://apps.microsoft.com/detail/9ntm0x0nwlfw?hl=uk-UA&gl=UA>.
15. RTA – Real Time Analyzer. URL: <https://studiosixdigital.com/audiotools-modules-2/acoustic-analysis-modules/rta/>.
16. Prodeus A., Didkovska M. Fourth Moment and Its Functional Transformations as Measures of Clipping Degree and Quality of Acoustic Signal. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2021, Vol. 64, № 5, pp. 255–265. <https://doi.org/10.3103/S0735272721050046>.
17. Audiometriya slukhu [Hearing audiometry]. URL: <https://bettertone.com.ua/uk/service/audiometriya/> [in Ukrainian].
18. Mul'tymediyi huchnomovtsi Edifier R1600T III [Multimedia speakers Edifier R1600T III]. URL: <https://edifier.com.ua/kolonki/stereo/r1600tii.html> [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.05.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 30.06.2025
 Дата публікації: 25.07.2025