

УДК 534.84

Пристрій для оперативної оцінки акустичних характеристик приміщення

Козерук С. О., Дворник О. О.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна

E-mail: skzrk@i.ua

Акустична якість приміщень суттєво впливає на комфортність умов проживання, роботи, проведення навчальних занять, лекцій та відпочинку. Майже 20% громадян ЄС (близько 80 млн. людей) страждають від рівня шуму вище за 65 дБА (такий рівень шуму вважається неприпустимим). Ще 170 мільйонів людей проживає у, так званих, «сірих» зонах (рівні шуму 55-65 дБА). Причому, відчувається суттєвий дискомфорт протягом доби. В результаті виникає, так звана, «шумова хвороба». Від небезпечного рівня шуму захищають національні закони (розроблені на основі міжнародних стандартів), які за допомогою санітарно-гігієнічних норм регламентують допустимі рівні шумів. Оцінку рівня шуму в приміщенні проводять по розрахованим еквівалентним рівням звукового тиску в третьоктавних смугах частот, виміряним за допомогою шумоміра в різних точках приміщення. Процес вимірювань займає багато часу. Для покращення ефективності вимірювань потрібні нові технічні рішення. В роботі запропоновано пристрій для дослідження акустичних характеристик приміщень, в основу функціонування якого покладено метод синтезу керованої просторової кореляційної характеристики, який дозволяє оцінювати кутовий розподіл рівня звуку, виявляти огорожуючі конструктивні елементи з малим рівнем звукоізоляції, локалізувати ефективні відбивачі звуку та оцінювати їх вклад в ревербераційний процес. Апробація макету пристрою показала можливість визначення каналів проникнення звуку через вікна та двері. Встановлена кореляція у часі між процесом реверберації та енергетичним вкладом окремих відбивачів і локалізовано їх розташування. Це дає змогу, в подальшому, аналізувати вплив ранніх відбиттів на сприйняття мови, оцінити розбірливість мови та якість звукових програм. Результати теоретичних і експериментальних досліджень проаналізовані, ілюстровані і добре узгоджуються.

Ключові слова: акустичні характеристики приміщень; синтезована просторова характеристика; локалізація відбивачів звуку

DOI: [10.20535/RADAP.2023.94.24-31](https://doi.org/10.20535/RADAP.2023.94.24-31)

Вступ

Акустична якість приміщень суттєво впливає на комфортність умов проживання, роботи, проведення навчальних занять, лекцій та відпочинку. До головних характеристик звукового поля у приміщенні відносять рівень шуму створеного зовнішніми та внутрішніми джерелами техногенного шуму та стандартний час реверберації звукового процесу. Нормативним документом [1] регламентуються рівні шуму у приміщеннях різного призначення в октавних смугах частот та інтегральні рівні кореговані по шкалі А. Для забезпечення нормативних значень рівнів шуму застосовують огорожувальні конструкції з необхідним рівнем звукоізоляції та віброізоляції. Оцінку рівня звукоізоляції конструкцій від повітряних шумів в натурних умовах [2] проводять по розрахованим еквівалентним рівням звукового тиску в третьоктавних смугах частот виміряним за допомогою шумоміра в декількох фіксованих точках приміщення. Вимірювання займає багато ча-

су, за який змінюються характеристики внутрішніх фонових шумів, що призводить до хибних оцінок. Покращити ефективність способів оцінки звукоізоляції можна використавши інтегральний шумомір з рознесеною системою мікрофонів або пристрій реалізуючий метод сканування простору керованим променем.

Час реверберації приміщення [3, 4] вважався одним з основних показників його акустичних властивостей. Для більш повної оцінки акустичної якості треба знати характеристики формування звукового процесу в приміщенні такі як відносні рівні звукового тиску, відношення енергії раннього та пізнього відгуку, вторинні енергетичні складові та рівні фонового шуму. Вимірювання часу реверберації приміщення ведуться методами інтегрованої імпульсної характеристики або переривання шуму. В [3] даються визначення цих методів:

«3.2 метод переривання шуму (interrupted noise method): Метод визначення спаду рівня звукового тиску (далі – криві спаду) безпосередньо запи-

сом спаду рівня звукового тиску після збудження приміщення широкосмуговим або смуговим шумом.

3.3 метод інтегрованої імпульсної перехідної характеристики (integrated impulse response method): Метод визначення кривих спаду шляхом інтегрування зверненої в часі зведеної в квадрат імпульсної перехідної характеристики.

3.4 імпульсна перехідна характеристика: Зміна в часі звукового тиску в деякій точці приміщення в результаті випромінювання імпульсу Дірака в іншій точці приміщення.»

В тому ж документі вказано: «На практиці неможливо створити та випромінювати справжню дельта-функцію Дірака, проте з метою вимірювання короткочасні нестационарні звуки (наприклад, звуки пострілів) можуть виявитися її прийнятною апроксимацією. Альтернативним методом виміру є застосування сигналу типу періодичної псевдовипадкової послідовності максимальної довжини або іншого детермінованого сигналу з плоским спектром, як у синусоїдального сигналу з частотою, що лінійно змінюється, і зворотним перетворенням вимірююного відгуку на імпульсну перехідну характеристику». Тому найбільш практичним на наш погляд є метод переривання шуму.

Криві спаду на початку процесу реверберації несуть корисну інформацію про енергію ранніх і пізніх відбиттів [3] (А.2.3). Це наштовхує на думку локалізації відбиваючих поверхонь з можливістю їх подальшої реконструкції для покращення акустичних характеристик приміщення.

Експертній оцінці приміщень присвячено багато теоретичних і практичних розробок. В роботі [5] досліджуються основні методи вимірювання часу реверберації, вказані переваги та недоліки кожного, даються поради по їх застосуванню. В [6, 7] запропоновано технологію акустичної експертизи приміщень з застосуванням апаратно-програмного комплексу «Штучна голова». Оцінювалась імпульсна характеристика та розраховувалась розбірливість мови у приміщенні. За твердженням авторів розбірливість мови в середині приміщення може бути меншою ніж біля стінок приміщення, а для пояснення цього ефекту потрібно дослідити внесок у звуковий процес окремих відгуків та локалізувати місце положення відбивачів.

Вплив ранніх відбиттів на розбірливість мови [8] досліджувався на основі двох спрощених моделей раннього відбиття звуку в кімнаті. Перша модель оцінює вплив на розбірливість детермінованих від-

биттів на інтервалі часу (0-50)мс. Друга модель досліджує вплив сукупності випадкових відбиттів на одному і тому ж інтервалі часу. Відмічено суттєву зміну розпізнання мови в залежності від місця положення відбивачів та їх звукопоглинання. Автори [9], вимірюючи звукопоглинання конструктивних елементів зазначають, що оцінка акустичних характеристик приміщення залежать не тільки від їх розташування, а й від місця установки мікрофонів. Рекомендується враховувати розташування конструктивних елементів та вносити відповідні поправки в оцінку звукопоглинання.

Звукоізоляція між сусідніми житловими приміщеннями [10] є однією з важливих характеристик внутрішньої екологічної ефективності квартири. Хоча на різницю рівнів звуку у суміжних приміщеннях головним чином впливають такі фактори, як індекс звукопоглинання стін, площа передачі звуку, еквівалентна площа поглинання звуку в приймальній кімнаті, але суттєвий вплив мають також шляхи проникнення звуку по бічних каналах таким як вікна, двері, і т.і. В роботі моделюються процеси передачі звуку по акустичним та вібраційним каналам в низькочастотному звуковому діапазоні. Вказується на актуальність розробки методів і пристроїв їх виявлення з метою підвищення звукоізоляції об'єктів на етапі підготовки до експлуатації.

Метою роботи є створення пристрою оперативної оцінки акустичних характеристик приміщення (ПООАХ) для вимірювання рівня проникаючих у приміщення повітряних шумів; визначення огорожуючих конструкцій з низьким рівнем звукоізоляції; вимірювання стандартного часу реверберації; локалізації конструктивних елементів – відбивачів звуку.

1 Обґрунтування рішення

Структурна схема способу оцінки акустичних характеристик приміщення зображена на Рис. 1.

Тестовий шум випромінюється акустичною системою – джерелом шуму в приміщення та сприймається групою мікрофонів підключених до АЦП пристрою реєстрації. Останній передає форматовану інформацію на ПК, програмне забезпечення якого реалізує алгоритми розрахунку часу реверберації, рівня акустичних шумів та кутового положення вторинних відбивачів.

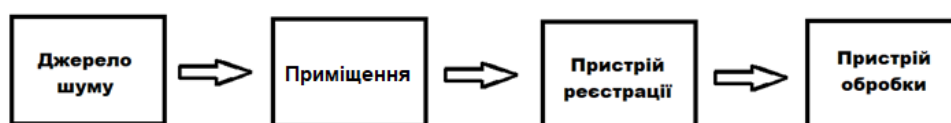


Рис. 1. Схема способу акустичної оцінки приміщення

Вимірювання часу реверберації ведеться методом переривання шуму згідно з [3, 4] і полягає у тому, що широкопasmовий шум з генератора проходить через октавний або 1/3-октавний smуговий фільтр і надходить на ненаправлений випромінювач. Випромінений шумовий сигнал приймається вимірювальними мікрофонами та записується на ПК. В певний момент часу сигнал вимикається та починається процес ревербераційного спаду рівня звукового тиску до значення, що визначається рівнем звукового фону в приміщенні. Аудіофайли поступають на вхід детектора формування огинаючої методом інтегрування Шредера, який розраховує криву спаду шляхом зворотної інтеграції імпульсного відгуку $p(t)$. За відсутності фонового шуму інтегрування починають з кінця імпульсного відгуку ($t \rightarrow \infty$), зведеного в квадрат, і продовжують до його початку. Спад звукової енергії $E(t)$ у часі визначають через звуковий тиск імпульсного відгуку $p(t)$:

$$E(t) = \int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau - \int_0^t p^2(\tau) d\tau = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d(-\tau).$$

Для мінімізації впливу фонового шуму на останню частину імпульсного відгуку застосовують таку процедуру. Якщо рівень фонового шуму відомий, визначають початкову точку інтегрування t_1 як точку перетину горизонтальної лінії фонового шуму і нахилу лінії кривої спаду імпульсного відгуку. Інтегрування продовжують у зворотному напрямку до початку імпульсного відгуку та визначають криву спаду $E(t)$:

$$E(t) = \int_{t_1}^t p^2(\tau) d(-\tau) + C.$$

Якщо C приймають рівним нулю, то початкова точка інтегрування створює систематичну похибку вимірювання часу реверберації. При максимально допустимій похибці вимірювання часу реверберації 5%, інтегрування імпульсного відгуку у зворотному напрямку повинне починатися від рівня не нижче рівня фонового шуму за умови збереження динамічного діапазону імпульсного відгуку, необхідного для визначення часу реверберації.

Оцінку часу реверберації по кривій спаду [3] (п.б) слід починати на 5дБ нижче початкового рівня звукового тиску. Діапазон оцінки має бути не менше 20дБ. Нижня частина діапазону оцінки повинна бути не менше ніж на 10дБ вище загального шуму фону, створюваного вимірювальною системою. Для більш точного визначення кривої спаду, за якою проводять розрахунок часу реверберації, використовують процедуру усереднення результатів декількох вимірювань при різних положеннях мікрофона або гучномовця в кожній смузї частот.

Розрахувавши криву спаду ревербераційного процесу перейдемо до проблеми локалізації конструктивних елементів – відбивачів звукової енергії. Процес реверберації формується відбитими хвилями, інтенсивність яких залежить, в основному, від акустичних характеристик огорожуючих конструкцій і елементів інтер'єру. Будемо розглядати відбивачі звуку як вторинні джерела звуку, які треба виявити і локалізувати. Для цього застосуємо методи пасивної локалізації джерел акустичного сигналу. В роботі [11] наведена умовна класифікація пасивних методів визначення координат джерел. Всі вони потребують масивів мікрофонів різної кількості та просторової конфігурації.

Найпростіший спосіб локалізації – метод керованої просторової характеристики направленості (КПХН) [12–14] реалізує алгоритм формувача променя із затримкою та сумою. Сигнали на виході мікрофонів затримують за часом, складають і формують вихідний сигнал. Маючи наперед розраховану матрицю затримок проводять сканування простору, а по максимальному відгуку оцінюють кутові координати джерела. Більш складні формувачі променя застосовують частотні фільтри до сигналів, тим самим реалізуючи різні алгоритми визначення кута приходу хвилі для одного або декількох джерел.

Ефективними є методи локалізації мовного джерела з високою роздільною здатністю на основі спектральної оцінки [15]. Ця група методів оцінки розташування включає сучасні методи формування променя, адаптовані в області спектрального аналізу високої роздільної здатності (приклад, алгоритм MUSIC). Однак ці підходи, являючись успішними до різноманітних програм обробки акустичних сигналів, малоефективні у задачах локалізації джерела мови.

Стратегія локалізації довгою акустичною базою [16] застосовує декілька пар рознесених у просторі мікрофонів і використовує двоетапну процедуру. На першому етапі робиться оцінка часу затримки мовних сигналів щодо пар просторово рознесених мікрофонів. Ці дані, разом зі знанням положення мікрофонів, на другому етапі використовуються для побудови гіперболічних кривих, які перетинаються в певному оптимальному сенсі для отримання оцінки розташування джерела. Цей підхід використовується у багатьох системах локалізації мовних джерел через обчислювальну практичність і достатню продуктивність.

Метод взаємної кореляційної функції (ВКФ) [17, 18] успішно застосовують для визначення кутового положення літаючих об'єктів – випромінювачів звуку, у відкритому просторі. Його перевага – підвищення завадостійкості в умовах дії ізотропних шумових завад. Подальший розвиток цього методу, який має назву методу фазової трансформації (РНАТ) [11, 17] застосовується для локалізації звукових джерел в умовах ревербераційної завади.

Ефективність методів локалізації, як правило, покращується зі збільшенням кількості мікрофонів у масиві [18], особливо за наявності несприятливих акустичних факторів. Однак локалізація джерела звуку може бути виконана адекватно невеликим масивом із 4 мікрофонів [17], що зменшує габарити та собівартість пристрою.

Для локалізації вторинних відбивачів звуку у приміщенні пропонується підхід, розглянутий і апробований в [17] для трекування дронів у відкритому просторі. Акустичний модуль пристрою оперативної оцінки акустичних характеристик має форму тетраедра, у вершинах якого встановлені мікрофони (Рис. 2). Основа тетраедра – рівносторонній трикутник, навколо якого можна описати коло радіусом r . Мікрофони M1, M2, M3, що знаходяться в вершинах основи піраміди мають кутові координати $\beta_i = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ; i = 1, 2, 3$ відповідно. Мікрофон M4 розташовано у вершині тетраедра.

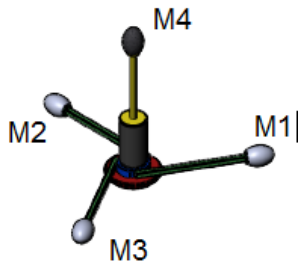


Рис. 2. Схема розташування мікрофонів у вершинах тетраедра

Для визначення часових затримок застосовують процедуру взаємної кореляційної обробки акустичних хвиль прийнятих мікрофонами. ВКФ $R_{ij}(\tau)$ розраховують між сигналами прийнятими парою мікрофонів $M_i, M_j (i = 1, 2; j = 2, 3; i \neq j)$ на деякому часовому проміжку спостереження T :

$$R_{ij}(\tau) = \int_0^T [x(t) + n(t)][x(t - \tau_{ij} + \tau) + m(t + \tau)] dt = R_{xx}(\tau - \tau_{ij}) + R_{xm}(\tau) + R_{nx}(\tau - \tau_{ij}) + R_{nm}(\tau), \quad (1)$$

де $x(t), n(t), m(t)$ – корисний сигнал та акустичні завади на входах мікрофонів відповідно; $R_{xx}(\tau - \tau_{ij})$ – кореляційна функція (КФ) вхідного сигналу із затримкою у часі τ_{ij} ; $R_{xm}(\tau), R_{nx}(\tau - \tau_{ij}), R_{nm}(\tau)$ – ВКФ процесів, які діють на входи приймачів. За умови відсутності кореляції між цими процесами та великого проміжку часу спостереження величини ВКФ дорівнюють нулю. Визначивши по максимуму ВКФ затримки τ_{ij} розраховують кути приходу звукової хвилі. У разі розбіжності отриманих для пар мікрофонів кутових оцінок користуються статистичним усередненням результатів.

Подальшим вдосконаленням способу визначення кута приходу хвилі є сканування довкілля із застосуванням алгоритму керованої просторової ко-

реляційної характеристики (КПКХ). Для цього між парами мікрофонів вводять затримки керування τ_{ij} визначені для кожного кутового напрямку (кута керування θ в площині основи піраміди), як різницю часу τ_i між окремими мікрофонами, розраховану за виразом [17]:

$$\tau_i = -\frac{r \cos(\theta - \beta_i)}{c}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

де β_i – кутова координата мікрофона; c – швидкість звуку у повітрі.

В подальшому розраховують та складають відповідні значення ВКФ :

$$P(\theta) = \sum_{i,j} R_{ij}(\tau_{ij}), \quad (3)$$

$$i = 1, 2; j = 2, 3; i \neq j,$$

де $P(\theta)$ – потужність на виході суматора в керованому напрямку прийому акустичної хвилі.

Максимальне значення потужності буде дорівнювати потроєному значенню потужностей прийнятих акустичних хвиль за умови компенсації затримками часу їх приходу до пар мікрофонів.

Розглянемо застосування методу КПКХ на прикладі сканування простору в горизонтальній площині запропонованою вище системою мікрофонів (Рис. 2). Для дослідження кривої спаду ревербераційного процесу в методі переривання шуму [3, 4] рекомендують застосовувати октавні, або третину октавні шумові сигнали (типу «білий шум») із смугою частот Δf , дисперсією σ_x^2 , та центральною частотою f_0 . КФ такого процесу записується виразом:

$$R_{xx}(\tau_{ij}) = \sigma_x^2 \frac{\sin(2\pi \Delta f (\tau - \tau_{ij}))}{2\pi \Delta f (\tau - \tau_{ij})} \cos(2\pi f_0 (\tau - \tau_{ij})). \quad (4)$$

З урахуванням (3), (4) були розраховані та побудовані діаграми КПКХ модуля з трьох мікрофонів розташованих в вершинах рівностороннього трикутника вписаного в коло радіуса $r = 0.43$ м. КПКХ для білого шуму з параметрами $\sigma_x^2 = 1, f_0 = 500$ Гц, $\Delta f = 350$ Гц та декількох значень кута керування $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ приведені на Рис. 3.

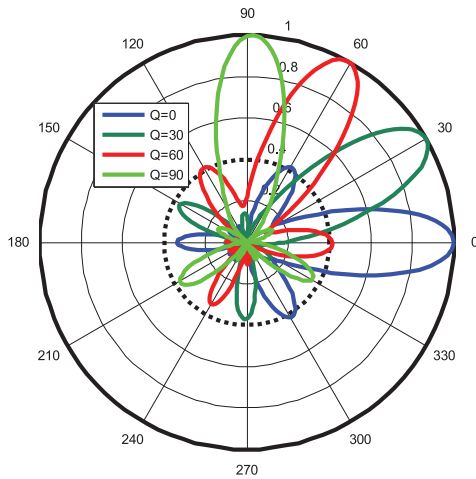


Рис. 3. Діаграми KPKX для різних кутів керування θ

Кут приходу хвилі визначається по максимуму KPKX. Похибка оцінки кута приходу хвилі на рівні -3 дБ становить половину ефективного кута розкриття KPKX, тобто $\Delta\theta = \theta_{\text{еф}}/2 = 12^\circ$. Гострота KPKX зростає із ростом центральної частоти та смуги частот шумового процесу (Рис. 4), що веде до зменшення похибки вимірювання кутових координат джерела звуку. Наприклад, для широкосмугового білого шуму з параметрами $\sigma_x^2 = 1$, $f_0 = 2000$ Гц, $\Delta f = 1400$ Гц отримуємо ефективний кут $\theta_{\text{еф}} = 2^\circ$. Таким чином можна стверджувати про перспективність запропонованого способу локалізації вторинних джерел звуку в задачі акустичної експертизи приміщень.

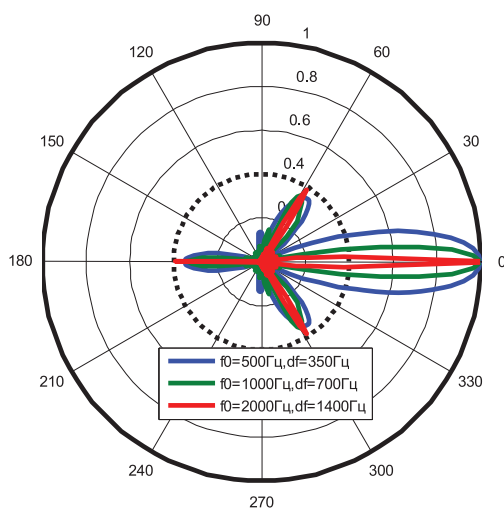


Рис. 4. Діаграми KPKX для трьох октав: $f_0 = 500$ Гц, 1000 Гц, 2000 Гц

2 Експериментальна перевірка пристрою

Для перевірки ПООАХ та запропонованого способу оцінки акустичних характеристик приміщення були проведені декілька експериментів в приміщенні розмірами $(10 \times 6 \times 4)$ м при температурі повітря 18°C . Приміщення мало декілька вікон та двері, розташовані на протилежній вікнам стіні. Вікна виходили на тихе подвір'я. Двері відчинялись в шумний коридор. Розташування ПООАХ представлено на Рис. 5 у складі:

- M1-M4 – мікрофони NTI MiniSPL;
- Звукова карта – M-Audio Fast Track Ultra;
- ПК – персональний комп'ютер ASUS.

Програмне забезпечення Cockos Reaper забезпечувало запис звуку з аудіокарти в робочу область програмного пакету Matlab.

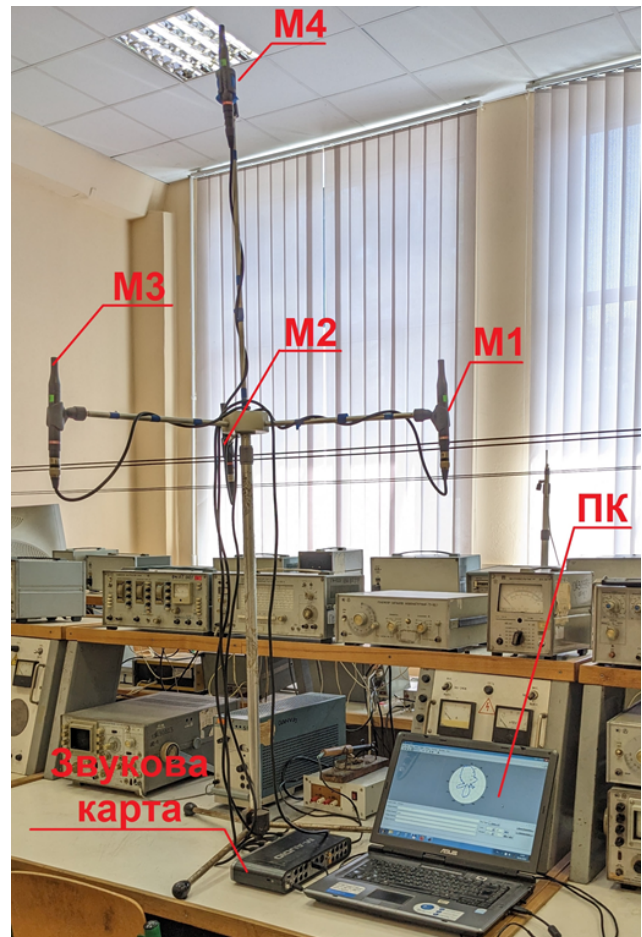


Рис. 5. Пристрій оперативної оцінки акустичних характеристик

Експериментальні дослідження проходили в три етапи. На першому етапі досліджувався кутовий розподіл та рівень фонового шуму в приміщенні за умови закритого приміщення, відкритого вікна або відкритої двері.

Наступним кроком було вимірювання часу реверберації по кривим спаду методом первного

шуму в октавній смузі частот білого шуму та встановлення характерних часових інтервалів формування поля (завершення випромінювання, характерні сегменти кривої спаду, які визначають вплив відбивачів звуку).

На третьому етапі, по характерним сегментам кривої спаду, досліджувався кутовий розподіл звукового поля в приміщенні та визначались кутові координати джерела звуку та відбиваючих поверхонь.

Перед початком експерименту проводилось калібрування мікрофонів разом з підсилювачами звукової карти. Це дало змогу в подальшому оцінювати рівні акустичного поля отримані ПООАХ.

Джерелом шуму була активна акустична система (АС) з смугою частот випромінювання (200–8000) Гц. Білий шум різної тривалості та спектра частот генерувався на ПК в програмному середовищі Matlab.

Дослідження фонового шуму в приміщенні велось в діапазоні частот (125–4000) Гц методом КПКХ. Результати першого етапу досліджень приведені у вигляді кутових діаграм (КД) в декартовій (Рис. 6) і полярній (Рис. 7) системах координат. Таке представлення дало змогу оцінити як розподіл рівня шумового фону, так і візуалізувати кутове розташування джерел шуму.

Для закритого приміщення (Рис. 6) поле рівномірне з середнім по куту значенням рівня $L = 28$ дБ та нерівномірністю $\Delta L = 2$ дБ. КД (Рис. 7) вказує на підвищений рівень шуму зі сторони вікон (сектор кутів 30° – 120°). У випадку відкритого вікна максимум КД (Рис. 7) вказує на джерело випромінювання (вікно) у напрямку 30° з рівнем $L = 44$ дБ (Рис. 6). Якщо двері відкриті у шумний коридор, то КД (Рис. 6, Рис. 7) має максимум $L = 56$ дБ з куту приблизно 234° .

Побудова кривої спаду і оцінка часу реверберації проводилась методом переривання шуму описаним вище. Для прикладу на Рис. 8 приведено результати отримані для октавної смуги з центральною частотою $f_0 = 1000$ Гц.

Час реверберації по рівню 55 дБ (-25 дБ від максимуму) становить $T_{20} = 0.3$ с, а оцінка стандартного часу реверберації $T_{CT} = 0.9$ с.

Дослідження кутового розподілу звукового поля в приміщенні та визначення кутових координат відбивачів звуку велись з використанням методу КПКХ. Для цього записи звукових файлів трьох мікрофонів сегментувались на відрізки по 100 мс починаючи з моменту виключення випромінювача (Рис. 8), фільтрувались октавним фільтром та оброблялись відповідним чином. Результати розрахунків приведені в декартовій (Рис. 9) та полярній (Рис. 10) системах координат.

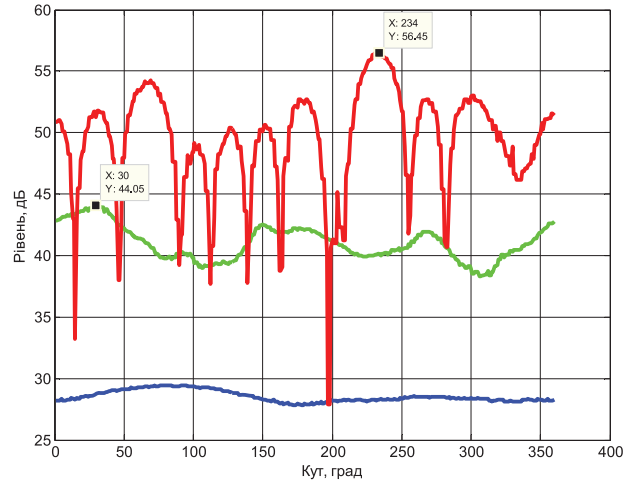


Рис. 6. Кутові діаграми рівня фону в приміщенні

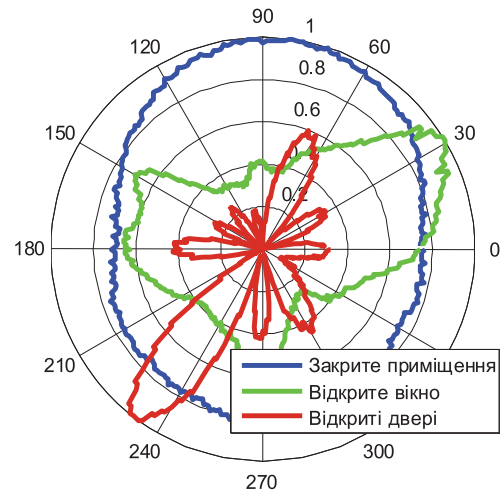


Рис. 7. Кутові діаграми нормованого шумового фону

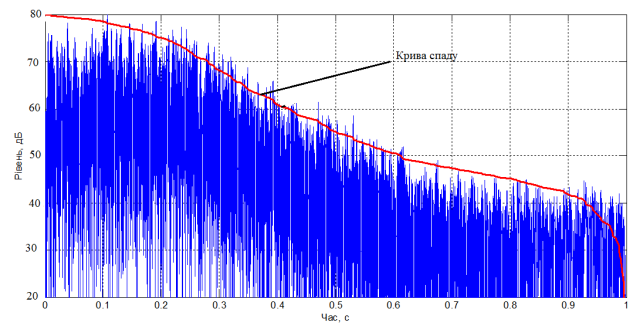


Рис. 8. Крива спаду ревербераційного процесу

Аналіз кутових діаграм (Рис. 9) дає можливість оцінити кількісний вклад окремих відбивачів в ревербераційний процес, а графіки на Рис. 10 демонструють їх кутове положення. Треба зауважити, що на Рис. 10 приведені нормовані КД, які визначають кутове положення відбивачів та їх відносний енергетичний вклад в ревербераційний процес на різних часових інтервалах.

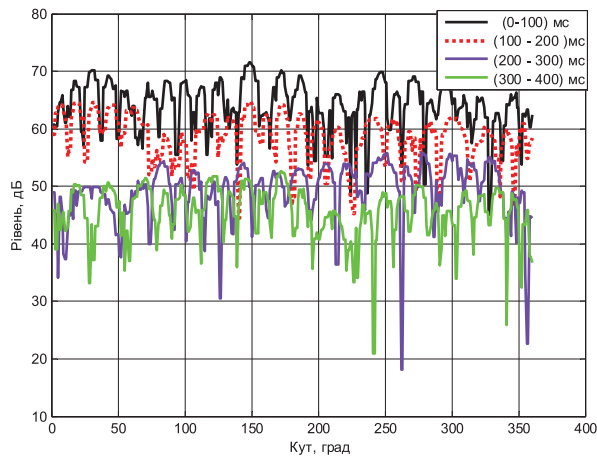


Рис. 9. Кутові діаграми ревербераційного процесу в окремі проміжки часу

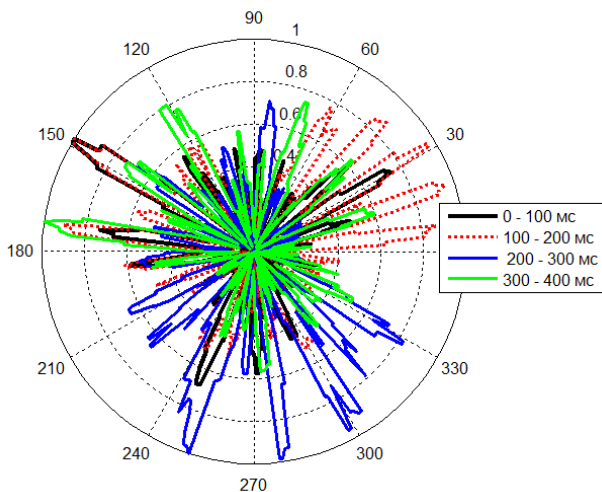


Рис. 10. Кутове положення відбивачів в окремі проміжки часу

Застосування методу КПКХ для оцінки проникнення звуку через огорожуючі конструкції та аналізу просторового розподілу ревербераційного поля в приміщенні має свої особливості. Як було показано вище (Рис. 5), параметри синтезованої КПКХ (ефективний кут розкриття, бічні пелюстки) залежать від смуги октавних частот вибраних для досліджень. На високих частотах кутові координати відбивачів та каналів проникнення звуку можна виявити більш точно, ніж на низьких. В подальшому бажано дослідити кутовий розподіл енергії ревербераційного процесу на різних частотах та встановити його відповідність кутовому розміщенню відбивачів.

Висновки

1. В роботі запропоновано пристрій для дослідження акустичних характеристик приміщень, в основу функціонування якого покладено метод синтезу керованої просторової кореляційної характеристики, який дозволяє оцінювати кутовий розподіл

рівня звуку, виявляти огорожуючі конструктивні елементи з малим рівнем звукоізоляції, локалізувати відбивачі звуку та оцінювати їх вклад в ревербераційний процес.

2. Розроблено, виготовлено та апробовано пристрій оперативної оцінки акустичних характеристик приміщення (ПООАХ) у складі акустичного модулю у вигляді тетраедру (Рис. 5) з розташованими у вершині мікрофонами, аудіокарти M-Audio Fast Track Ultra та ПК.

3. Розроблено програмне забезпечення передачі даних з аудіокарти на ПК та написані коди обробки даних в Matlab згідно запропонованого алгоритму.

4. Апробація макету в лабораторних умовах показала можливість локалізації окремих конструктивних елементів, наприклад вікон або дверей, як каналів проникнення звуку. Можна стверджувати, що запропонований метод та розроблений на його основі пристрій може бути застосовано для оперативної оцінки рівня зовнішніх шумів у приміщенні та виявляти шляхи його проникнення.

5. Пристрій оперативної оцінки акустичних характеристик приміщення дає можливість визначати кутове положення окремих відбивачів та їх вклад в ревербераційний процес. Це дає змогу, використовуючи підходи запропоновані в [6–8], оцінити розбірливість мови та якість звукових програм.

6. Проведені дослідження підтвердили можливість застосування ПООАХ для задач акустичної експертизи приміщень та поставили питання розробки методики його застосування.

References

- [1] DBN V.1.1-31:2013 Zakhyst terytorii, budynkiv i sporud vid shumu [DBN V.1.1-31:2013 Protection of territories, buildings and structures from noise]. *Servis dokumentiv BUDSTANDART Online [BUDSTANDART Online document service]*.
- [2] DSTU B V.2.6-86:2009 Konstruktsii budynkiv i sporud. Zvukoizoliatsiia ohorodzhuvalnykh konstruktsii. Metody vymiriuvannia [DSTU B V.2.6-86:2009 Structures of buildings and structures. Sound insulation of enclosing structures. Measurement methods]. *Servis dokumentiv BUDSTANDART Online [BUDSTANDART Online document service]*.
- [3] ISO 3382-1:2009. Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces. *ISO*.
- [4] ISO 3382-2:2008. Acoustics. Measurement of room acoustic parameters. Part 2. Reverberation time in ordinary rooms. *ISO*.
- [5] Hořák, Pavel. (2016). Measurement of the reverberation time. *ResearchGate*. DOI:10.13140/RG.2.2.17246.64321.
- [6] Dvornyk O. O., Motorniuk D. I., Didkovska M. V., Prodeus A. M. (2020). Hardware and Software System "Artificial Head". Part 2. Evaluation of Speech Intelligibility in Classrooms. *Microsystems Electronics and Acoustics*, Vol. 25, Iss. 3, pp. 48-55. doi: 10.20535/2523-4455.me.209928.

- [7] Dvornyk O. O., Motorniuk D. I., Didkovska M. V., Prodeus A. M. (2020). Artificial Software Complex "Artificial Head". Part 1. Adjusting the Frequency Response of the Path. *Microsystems Electronics and Acoustics*, Vol 25, Iss. 1, pp. 56-64. doi: 10.20535/2523-4455.me.198431.
- [8] Prodeus A., Didkovska M., Kukharicheva K. and Motorniuk D. (2020). Modeling the Influence of Early Sound Reflections on Speech Intelligibility. *2020 IEEE 6th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, pp. 47-50. doi: 10.1109/MSNMC50359.2020.9255657.
- [9] Wang, Yueyue; et al. (2021). Influence of the acoustic structures placement on the measurements in a reverberation room. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, pp. 429-433. DOI: 10.3397/IN-2021-1474.
- [10] Aida, Y., Inoue, N., & Sakuma, T. (2019). An experimental study on the influence of incident characteristics on sound insulation between rooms. *Journal of Environmental Engineering (Japan)*, Vol. 84, Iss. 764, pp. 893-902. <https://doi.org/10.3130/aije.84.893>.
- [11] DiBiase, J. H., Silverman, H. F., Brandstein, M. S. (2001). Robust Localization in Reverberant Rooms. In: Brandstein, M., Ward, D. (eds) *Microphone Arrays*. Digital Signal Processing. *Springer*. doi: 10.1007/978-3-662-04619-7_8.
- [12] Oleinikov A. N., Shirokiy O. M. (2014). Matematycheskoe modelyrovanye akustycheskoho kanala utechky rechevoi ynformatsyy [Mathematical model of the acoustic channel for the leakage of speech information]. *Radyotekhnika [Radio engineering]*, Vol. 177, pp.161-171.
- [13] Silverman H. F., Patterson W. R., Flanagan J. L. and Rabinkin D. (1997). A digital processing system for source location and sound capture by large microphone arrays. *1997 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 1, pp. 251-254. doi: 10.1109/ICASSP.1997.599616.
- [14] Case E. E., Zelnio A. M. and Rigling B. D. (2008). Low-Cost Acoustic Array for Small UAV Detection and Tracking. *2008 IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, pp. 110-113. doi: 10.1109/NAECON.2008.4806528.
- [15] Mu Peng Cheng, Yin Qin Ye, Zhang Jian Guo (2010). A wideband beamforming method based on directional uniform circular arrays. *Science China Information Sciences*, Vol. 53, Iss. 12, pp. 2600-2609.
- [16] Brandstein M. S., Adcock J. E. and Silverman H. F. (1997). A closed-form location estimator for use with room environment microphone arrays. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, Vol. 5, No. 1, pp. 45-50. doi: 10.1109/89.554268.
- [17] Benjamin M. and Goldman G. H. (2014). Acoustic Detection and Tracking of a Class I UAS with a Small Tetrahedral Microphone Array. *Defence Technical Information Center*. DOI: 10.21236/ADA610599.
- [18] Sedunov A., Salloum H., Sutin A., Sedunov N. and Tsyuryupa S. (2018). UAV Passive Acoustic Detection. *2018 IEEE International Symposium on Technologies for Homeland Security (HST)*, pp. 1-6. doi: 10.1109/THS.2018.8574129.

Device for Operational Assessment of Acoustic Characteristics of Room

Kozeruk S. O., Dvornyk O. O.

Introduction. The acoustic quality of the premises significantly affects the comfort of living, working, training, lectures and recreation. The main characteristics of the sound field in the room include the noise level created by external and internal sources of man-made noise and the standard reverberation time of the sound process. The measurement takes a long time, during which the characteristics of external man-made noises change, which leads to false estimates. It is possible to improve the assessment of sound insulation by using an integral sound meter or a device for operational assessment of the acoustic characteristics (DOAAC) of the room proposed in the work.

Theoretical Results. The paper proposes a device for researching the acoustic characteristics of rooms, the basis of which is the method of synthesis of the controlled spatial correlation characteristic, which allows to evaluate the angular distribution of the sound level, to identify enclosing structural elements with a low level of sound insulation, to localize effective sound reflectors and to evaluate their contribution to the reverberation process.

Experiment. Approbation of the device in laboratory conditions showed the possibility of localizing individual structural elements, such as windows or doors, as sound penetration channels. The correlation in time between the reverberation process and individual reflectors is established and their angular position is determined. The conducted researches confirmed the possibility of applying DOAAC for the tasks of acoustic examination of premises and posed the question of developing a methodology for further application.

Keywords: acoustic characteristics of premises; synthesized spatial characteristics; localization of sound reflectors