Розрахунок локальних параметрів при проєктуванні акустики залів

Олег Сергейчук, професор, д.т.н, професор [1] (ORCID: 0000-0003-0226-3923)

[1] *Київський національний університет будівництва і архітектури, м.Київ, Україна*

АНОТАЦІЯ

У проєкті акустики залів, крім глобальних параметрів, таких як час реверберації, надзвичайно важливу роль відіграють локальні критерії, що безпосередньо пов'язані з особливостями сприйняття звуку людиною, що сидить на конкретному місці. До таких параметрів належать час запізнювання відбитих променів *ITDG* (Initial Time Delay Gap), індекс розбірливості мови *STI* (Speech Transmission Index), індекс ясності C_{80} (Clarity Factor), енергія ранніх бічних відбиттів J_{LF} (Lateral Energy Fraction) та індекс гучності *G* (Strength Factor). Розглядається використання спрощених аналітичних формул для попереднього розрахунку та їхнє місце у сучасному проєктуванні поряд з комп'ютерним акустичним моделюванням, що базується на методі трасування променів.

Ключові слова: акустичні параметри, акустика залів, локальні параметри, ранні звукові відбиття, індекс розбірливості мови, індекс ясності, енергія ранніх бічних звукових відбиттів, індекс гучності, акустичне моделювання

1. ВСТУП

Проєктування акустики приміщень є складним багатофакторним завданням, що вимагає врахування як загальних, так і локальних акустичних характеристик. Традиційно, ключовим параметром, що визначав акустичну якість залу, був час реверберації (T_{60} або RT_{60}). Він є інтегральним параметром, що характеризує весь об'єм приміщення та залежить від його розміру та звукопоглинальних властивостей поверхонь. Однак, численні дослідження показали, що сам по собі час реверберації не може повною мірою описати якість сприйняття звуку в різних точках залу. Людський слух надзвичайно чутливий до структури ранніх звукових відбиттів. Саме з особливостями сприйняття цих відбиттів пов'язані так звані локальні акустичні критерії.

До таких локальних критеріїв належать: *час запізнювання відбитих променів* ITDG, індекс розбірливості мови (*STI*), індекс ясності (C_{80}), енергія ранніх бічних відбиттів (J_{LF}) та індекс гучності (*G*). Дослідження цих параметрів є обов'язковим етапом при проєктуванні залів різного призначення, оскільки їхня важливість залежить від цільової функції приміщення [1]. У мовних залах, як-от лекційні аудиторії чи театри, пріоритет надається критеріям розбірливості, тоді як у музичних приміщеннях, наприклад, концертних залах чи оперних театрах, фокус зміщується на параметри, що впливають на якість звучання, його просторовість та об'ємність.

На сьогоднішній день існують комп'ютерні програми для реалізації акустичного моделювання приміщень, що дозволяють створювати і редагувати тривимірну модель конкретного приміщення і визначати для нього як структуру ранніх звукових відображень, так і значення основних якісних акустичних критеріїв. В даний час найпопулярнішими з таких рішень є програми EASE [2], CATT-Acoustic [3], ODEON [4]. Ці програми базуються на методику трасування променів та орієнтовані на роботу з тривимірною графікою. Усі ці програми досить дорогі і вимагають від проєктувальників певної підготовки з їх використання. Тому актуальним є аналіз, розробка та використання спрощених методів визначення локальних акустичних критеріїв, що можна використовувати на етапі ескізного проєктування акустичних залів.

2. ЗАПІЗНЮВАННЯ ВІДБИТИХ ПРОМЕНІВ

Оскільки відбитий від поверхонь залу звук проходить більший шлях ніж прямий звук, що безпосередньо надходить до слухача від джерела звуку, тому він приходить з певним запізнюванням. Прийнято розділяти відбиття на ранні і пізні. Ранні відбиття підсилюють прямий звук, є корисними і, згідно [1], усі місці для глядачів, що розташовані від джерела звуку далі ніж 8 м у мовних залах та 10 м у музичних залах, повинні бути забезпечені першими інтенсивними ранніми звуковими відбиттями. А пізні відбиття є шкідливими і з ними треба боротися шляхом зміни форми залу чи окремих екранів, або застосуванням звукопоглинальних матеріалів та конструкцій.

Дослідження на запізнювання відбитих променів у проєкті доречно проводити за методом О.Л. Підгорного [5]

3. ІНДЕКС РОЗБІРЛИВОСТІ МОВИ

Індекс розбірливості мови *STI* – це метод виміру розбірливості мови в шумному і/чи ревербируючому середовищі, який базується на використанні модуляційної передаточної функції *MTF* (The Modulation Transfer Function) [6].

У проєктній практиці можна рекомендувати розраховувати *STI* на основі їх співвідношення з відсотком артикуляційних втрат приголосних – %*ALCONS* (percentage Articulation Loss of Consonants), який попередньо розраховуються за методикою В.М.А Пейтца [7].

Розрахунок %ALCONS проводиться за формулами:

$$\%ALCONS = \frac{200r^2T^2n}{VQM} + K \quad \text{при } r < r_{кр}; \qquad (1)$$

$$\%ALCNS = 9T + K \text{ при } r \geq r_{кр}, \qquad (2)$$

де r – відстань від слухача до найближчого джерела звуку, м; $r_{кр} = 0.2(QV/T)^{0.5}$ – критична відстань для розбірливості, м; V – об'єм приміщення, м^3; T – час реверберації на частоті 1400 Гц, с,; Q – направленість звуку найближчого джерела (якщо невідомо, то приймається рівним 1); M – поправочний коефіцієнт, що враховує вплив різних акустичних факторів, як правило, дорівнює 1; n – загальна

кількість рівних джерел звуку (при використанні умовної точки звучання приймається $n = 1$); K – фактор слухача ≈ 2 % для слухача з хорошим слухом.

Між $\%ALCONS$ і STI встановлена залежність:

$$STI = 1\text{-}0.46\log(\%ALCONS), \quad (3)$$

за допомогою якої розраховується індекс розбірливості мови [8].

4. ІНДЕКС ЯСНОСТІ

Індекс C_{80} – це відношення звукової енергії, що прийшла за перші 80 мс, до всієї енергії, що прийшла після 80 мс, виражене в децибелах:

$$C_{80} = 10\log\left(\frac{E_{direct} + E_{early}}{E_{late}}\right), \quad (4)$$

де E_{direct} – енергія прямого звуку, E_{early} – рання відбита звукова енергії в межах 80 мс після надходження прямого звуку, E_{late} – енергія пізнього відбиття після 80 мс.

При проєктуванні залів для розрахунку C_{80} найчастіше використовується переглянута теорія рівня звуку у приміщеннях, запропонована М. Барроном [9]. Значення складових формули (4) визначаються за такими рівняннями:

$$E_{direct} = \frac{100}{r^2}; \quad (5)$$

$$E_{early} = \frac{31200}{V} e^{-\frac{0,04r}{T}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1,11}{T}}\right); \quad (6)$$

$$E_{late} = \frac{31200}{V} e^{-\frac{0,04r}{T}} \cdot e^{-\frac{1,11}{T}}. \quad (7)$$

5. ЕНЕРГІЯ РАННІХ БОКОВИХ ВІДБИТТІВ

Рання звукова енергія, що надходить від бокових стін, може віртуально розширити ширину джерела звуку, зробити його більш об'ємним. Це позитивно впливає на сприйняття музикального дійства. Було встановлено, що величина ефекту розширення джерела пов'язана з часткою звукуJ_{LF}, що надходить з боків протягом перших 80 мс після прямого звуку:

$$J_{LF} = \frac{E_{early,l}}{E_{direct} + E_{early}}, \quad (8)$$

де $E_{early,l}$ – рання відбита звукова енергії від бокових стін в межах 80 мс після надходження прямого звуку; E_{direct}, E_{early} – теж саме, що у формулі (4).

Методика виміру J_{LF} у існуючих залах викладена у [6]. При проєктуванні, у першому наближенні, значення $E_{early,l}$ пропонується використовувати формулу:

$$E_{early,l} = E_{early} \frac{S_l(1 - \alpha_{\text{сер},l})}{S_\Sigma(1 - \alpha_{\text{сер}})}, \quad (9)$$

де $\alpha_{\text{сер}}$ – середній коефіцієнт звукового поглинання приміщення; $\alpha_{\text{сер},l}$ – середній коефіцієнт звукопоглинання бокових стін приміщення; S_Σ – загальна площа внутрішніх поверхонь приміщення, м^2; S_l – площа бокових стін, м^2.

Ця формула суттєво спрощує складне психоакустичне явище сприйняття бічного звуку до чисто геометричного та енергетичного співвідношення коефіцієнтів звукопоглинання поверхонь і потребує подальших досліджень.

6. ІНДЕКС ГУЧНОСТІ

Індекс гучності G визначається як рівень звукового тиску, викликаного всеспрямованим джерелом звуку на сцені, виміряний у місці розташування слухача в залі, щодо рівня звукового тиску на відстані 10 м від джерела звуку у вільному полі. Загальний рівень звуку відноситься до рівня усіх звуків (ранніх та пізніх), отриманих у точці прослуховування. G, дБ, можна записати як:

$$G = L - L_{0,10}, \quad (10)$$

де L – рівень звуку у точці прослуховування у приміщенні, дБ; $L_{0,10}$ – рівень звуку на відстані 10 м від такого ж джерела звуку у вільному полі, дБ.

Виходячи з теорії М. Баррона [9], G, дБ, можна визначити за формулою:

$$G = 10\log(E_{direct} + E_{early} + E_{late}), \quad (11)$$

де E_{direct}, E_{early} та E_{late} визначаються за формулами (5)-(7).

7. ВИСНОВКИ

Наведені формули дозволяють проєктантам спрогнозувати локальні акустичні параметри залу під час його проєктування.

Список літератури

[1] ДБН В.2.2-16:2019. Культурно-видовищні та дозвіллєві заклади. Чинні від 2019-11-01. Київ: Мінрегіон України, 2019. 97 с.

[2] EASE 5 Third Edition - The modern approach to electro- and room acoustic simulation. URL: https://www.afmg.eu/en/ease

[3] CATT-Acoustic v 9.1. *CATT official website*. URL: https://www.catt.se/CATT-Acoustic.htm

[4] ODEON Room Acoustics. *ODEON official website*. Software. URL: https://odeon.dk/

[5] Подгорный А. Л. К анализу первых отражений звука при криволинейных формах залов. *Прикл. геометрия и инж. графика* : республ. межвед. науч.-техн. сб. Київ : Будівельник, 1980. Вып. 30. С. 7-10.

[6] ДСТУ EN IEC 60268-16:2022 Обладнання звукових систем. Частина 16. Об'єктивне оцінювання розбірливості мови за індексом передавання мови (EN IEC 60268-16:2020, IDT; IEC 60268-16:2020, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 76 с.

[7] V.M.A Peutz, W. Klein, Articulation loss of consonants as a criterion for speech transmission quality. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1971.Vol. 19, nr. 11, pp 915-922.

[8] Intelligibility Conversion. *Wiki.audio.* URL: https://wiki.audio/En/0020

[9] Barron M. Auditorium Acoustics and Architectural Design. 2nd edition. London; New York: Spon Press, 2009. 504 p. URL: https://danylastchild07.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/05/auditoracoustics.pdf