

**МІНІСТЕРСТВО КУЛЬТУРИ ТА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПОЛІТИКИ
УКРАЇНИ**

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ КЕРІВНИХ КАДРІВ КУЛЬТУРИ І
МИСТЕЦТВ**

ІНСТИТУТ ПЕРФОРМАТИВНИХ МИСТЕЦТВ

Кафедра музичного мистецтва

Кваліфікаційна робота

На здобуття ступеня «Магістр»

на тему:

«Засоби вирішення акустичних проблем при проведенні масових музичних
заходів»

Виконав: здобувач II курсу
магістратури,
групи МММ 23-24, спеціальності
025 «Музичне мистецтво»

Журко Євгеній Дмитрович

Керівник: доктор мистецтвознавства,
професор кафедри музичного
продакшну та звукорежисури

Козлін Валерій Йосипович

Рецензент: канд. мистецтвознавства,
відмінник освіти України, доцент
кафедри виконавських дисциплін №1,
Київської муніципальної академії
музики ім. Р.М.Глієра

Туріна Олена Андріївна

Допустити до захисту

Протокол засідання кафедри

від «___» _____ 20__ р. № ___

Завідувач кафедри

Грищенко В.І. _____ (підпис)

АНОТАЦІЯ

Журко Є.Д.

«Засоби вирішення акустичних проблем при проведенні масових музичних заходів»

Кваліфікаційна робота освітнього рівня- магістр, на правах рукопису. Спеціальність 025 — «Музичне мистецтво» (Звукорежисура). — Київ, 2025.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню сучасних підходів до вирішення акустичних проблем у процесі організації та проведення масових заходів — концертів, конференцій, презентацій та фестивалів.

У роботі розглянуто фізико-акустичні, технічні та психоакустичні чинники, що впливають на якість звучання у відкритих і закритих просторах. Проаналізовано типові проблеми реверберації, фазових спотворень, фідбеку та нерівномірного розподілу звукового тиску.

Особливу увагу приділено використанню сучасних технологій моделювання та цифрової обробки сигналу — систем MAPP 3D, SMAART, Room EQ Wizard, а також стандартів AES, EBU, ISO для калібрування акустичних параметрів простору.

На основі аналізу практичних кейсів компанії Alpha Group розроблено оптимізаційні рішення для систем delay-зон, фазової корекції та балансування гучності у великих залах і відкритих майданчиках.

Результати дослідження можуть бути використані у практичній діяльності звукорежисерів, інженерів ФОН, викладачів спеціалізованих освітніх програм та під час підготовки акустичних проєктів масових подій.

Ключові слова: акустика, реверберація, фазова корекція, delay-зона, SMAART, MAPP 3D, звукопідсилення, ФОН, масові заходи, просторове моделювання.

SUMMARY

Zhurko Y. D.

«Methods and Tools for Solving Acoustic Problems in Large-Scale musical Events

Master's qualification work (Music Art, Sound Engineering). — Kyiv, 2025.

The qualification work focuses on the study of modern approaches to solving acoustic problems during the organization and performance of large-scale events — concerts, conferences, presentations, and festivals.

The research analyses the physical, technical, and psychoacoustic factors influencing the sound quality in open and enclosed spaces. Typical issues such as reverberation, phase distortion, feedback, and uneven sound pressure distribution are considered.

Special attention is given to the use of modern sound modelling and digital processing technologies — MAPP 3D, SMAART, Room EQ Wizard — and to international standards such as AES, EBU, ISO for acoustic calibration. Based on the practical cases of Alpha Group, optimized solutions for delay zones, phase correction, and loudness balancing in large-scale venues and outdoor settings were developed.

The results of the research can be applied in the practical work of sound engineers, FOH specialists, educators in audio-related programs, and in the design of acoustic solutions for mass events.

Keywords: acoustics, reverberation, phase correction, delay zone, SMAART, MAPP 3D, sound reinforcement, FOH, mass events, spatial modelling.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИРОДНІ ЗАСАДИ АКУСТИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА МАСОВИХ ЗАХОДІВ	14
1.1 Огляд літератури за темою «Класичні та фундаментальні праці з акустики»	14
1.2. Поняття та класифікація масових заходів з позицій звукорежисури	18
1.3. Акустичне середовище: властивості, просторові параметри та фізичні закони поширення звуку	21
1.4. Характеристика типових акустичних просторів (відкриті, закриті, комбіновані)	25
1.5. Архітектурно-матеріальні чинники, що впливають на формування звукового поля	27
1.6. Основні принципи акустичного проектування сценічних та глядацьких просторів	30
1.7. Сучасні методи вимірювання та аналізу параметрів звуку (SPL, RT60, STI, FFT)	32
1.8. Особливості акустичного середовища як основи подальшого дослідження	34
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТИПОВИХ АКУСТИЧНИХ ПРОБЛЕМ У ПРОСТОРАХ МАСОВИХ ЗАХОДІВ	37
2.1. Основні категорії акустичних спотворень і їх вплив на сприйняття звуку	37
2.2. Проблеми нерівномірного розподілу звуку та втрати чіткості сигналу у звуковому полі	39
2.3. Неоднорідність розподілу звукового тиску в аудиторії	42
2.4. Фазові спотворення та затримки сигналу в системах звукопідсилення	44

2.5. Виникнення акустичного зворотного зв'язку (фідбеку) та шляхи його запобігання _____	46
2.6. Психоакустичні аспекти сприйняття звуку великими аудиторіями __	49
2.7. Систематизація типових проблем і постановка практичних завдань _____	52

РОЗДІЛ 3. ЗАСОБИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРІШЕННЯ АКУСТИЧНИХ ПРОБЛЕМ ПРИ МАСОВИХ ЗАХОДАХ _____

54

3.1. Принципи оптимізації звукового простору засобами розміщення систем звукопідсилення _____	54
---	----

3.2. Застосування акустичних матеріалів, відбивачів і поглиначів звуку _

56

3.3. Використання delay-зон, лінійних масивів (line array) та фазової корекції _____	59
--	----

3.4. Цифрова обробка звуку: еквалізація, компресія, лімітування, фазова узгодженість _____	61
--	----

3.5. Інструменти вимірювання та моделювання: MAPP 3D, SMAART, Room EQ Wizard, Lake Controller _____	63
---	----

3.6. Формування комплексного підходу до вирішення акустичних проблем

_____	65
-------	----

ВИСНОВКИ _____	68
-----------------------	-----------

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ _____	80
---	-----------

ДОДАТКИ _____	83
----------------------	-----------

ВСТУП

Актуальність дослідження

У XXI столітті індустрія масових заходів — таких як концерти, конференції, фестивалі, презентації, театралізовані події, освітні форуми та інсталяції — зазнала значного кількісного й якісного зростання. Разом із розвитком подієвої культури підвищилися вимоги до технічного забезпечення заходів, серед якого ключову роль відіграє якість звукового середовища. Саме звук визначає можливість адекватного сприйняття інформації, емоційний вплив події, рівень занурення глядача та загальну художню цілісність події.

У сучасних умовах звукорежисура вже не зводиться до базового підсилення звуку. Вона перетворилася на міждисциплінарну галузь, у якій поєднуються фізика звуку, акустика приміщень, архітектурна інженерія, цифровий сигнал-процесинг, математичне моделювання, психоакустика й технології просторового аудіо. Розвиток складних звукових систем, цифрових протоколів та програмних засобів аналізу сприяє тому, що якість звукового супроводу дедалі більше залежить від глибини теоретичного розуміння процесів, які визначають формування звукового поля.

Актуальність проблеми зумовлена тим, що навіть за наявності високоякісного технічного обладнання в реальних умовах нерідко виникають такі акустичні явища, як:

- нерівномірний розподіл рівня звукового тиску (SPL) у просторі;
- надмірна або неконтрольована реверберація, яка знижує розбірливість;
- фазові спотворення та інтерференційні ефекти, що призводять до «частотних провалів»;
- акустичний зворотний зв'язок (фідбек);
- втрата чіткості та артикуляції мовлення у великих або акустично складних просторах;

- домінування низькочастотної енергії, що створює перевантажене акустичне враження.

Ці проблеми характерні для як стаціонарних, так і тимчасових майданчиків. Більше того, стандартизовані підходи до проектування акустичних систем часто орієнтовані на типові архітектурні простори, тоді як більшість сучасних масових заходів проходить у нестандартних, акустично непередбачених або змінних умовах: виставкових залах, павільйонах, трансформованих конференц-просторах, спортивних аренах або відкритих міських територіях.

Сучасні технології пропонують широкі можливості для вдосконалення звукового середовища — від цифрових систем керування фазою до складних моделей розповсюдження хвильового поля, однак для їх ефективного застосування необхідне ґрунтовне теоретичне підґрунтя. Тому зростає потреба в систематизації наукових методів аналізу та вирішення акустичних проблем.

Отже, актуальність роботи визначається:

1. Стрімким зростанням кількості масових заходів та ускладненням вимог до якості звуку.
2. Необхідністю теоретичного обґрунтування процесів формування звукового поля у складних просторах.
3. Потребою у системному аналізі акустичних проблем і методів їхнього усунення.
4. Залежністю якості звукового середовища від коректного використання програмних і математичних засобів моделювання.
5. Недостатньою кількістю комплексних наукових досліджень у галузі прикладної акустики, орієнтованих саме на масові події.

Стан наукової розробленості проблеми

Дослідження звукового середовища має тривалу історію. Класичні праці в галузі акустики й архітектурної акустики (Гельмгольц, Сабін, Кнутсен) заклали фундамент для розуміння фізичних закономірностей поширення звуку, реверберації, взаємодії звукових хвиль із матеріалами та геометрією приміщень.

Ці дослідження стали основою для формування методів проектування концертних залів і театрів.

У ХХ столітті значний розвиток отримала електроакустика — галузь, що вивчає взаємодію електричних та акустичних систем. Праці Олівера, Вільямса, Мюллера та інших дослідників розширили знання про чутливість, спрямованість та частотні характеристики гучномовців.

Паралельно розвивалася психоакустика, яка пояснює механізми сприйняття звуку людським слухом, зокрема:

- явища маскування;
- локалізацію звукових джерел;
- сприйняття ранніх і пізніх відбиттів;
- інтеграцію слухових сигналів у просторі.

У другій половині ХХ — на початку ХХІ століття з'явилися математичні моделі, що описують поширення звуку в тривимірному просторі, та потужні програмні інструменти моделювання (EASE, MAPP, CATT-Acoustic). Це дозволило перейти від емпіричного підходу до науково-обґрунтованого.

У сучасних дослідженнях активно вивчаються:

- хвильові моделі розповсюдження звуку;
- метод кінцевих елементів;
- методи променевого трасування;
- цифрова обробка сигналів (DSP);
- іммерсивні аудіосистеми.

Однак комплексні теоретичні праці, що поєднують акустику, психоакустичні аспекти та методи аналізу звукового середовища саме в умовах масових подій, усе ще є недостатньо розвиненими.

Мета дослідження

Метою дослідження є визначення, систематизація та теоретичне обґрунтування засобів усунення акустичних проблем у процесі проведення

масових заходів, а також розроблення цілісної теоретичної моделі оптимізації звукового середовища в умовах різних просторових конфігурацій.

Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати теоретичні засади формування акустичного середовища та його вплив на якість звукового сприйняття.
2. Визначити основні типи акустичних проблем, що виникають у різних просторових умовах масових заходів.
3. Розглянути сучасні технології вимірювання, аналізу та моделювання звукових систем (зокрема, MAP3D, SMAART, Room EQ Wizard).
4. Оцінити ефективність використання цифрових мікшерних пультів, систем delay-зон, line array та інструментів фазової корекції.
5. На прикладі діяльності компанії Alpha Group проаналізувати практичні методи вирішення акустичних викликів у реальних умовах проведення заходів.
6. Сформулювати рекомендації щодо оптимізації звукових систем для підвищення якості аудіовідтворення на масових подіях.

Об'єкт дослідження

Масові заходи.

Предмет дослідження

Засоби усунення акустичних проблем, при проведенні масових музичних заходів.

Методи дослідження

У роботі застосовано:

- системний метод — для комплексного розгляду звукового середовища як взаємодії акустичних, інженерних та психоакустичних чинників;

- аналітичний метод — для вивчення фізичних закономірностей поширення хвиль і формування звукового поля;
- порівняльний метод — для зіставлення різних теоретичних підходів до вирішення акустичних проблем;
- методи математичного моделювання — включно з хвильовими моделями, променевою трасою, методами цифрової обробки сигналів;
- методи теоретичного акустичного аналізу — для дослідження параметрів SPL, реверберації, STI, фазових характеристик;
- аналіз алгоритмів сучасних систем вимірювання (SMAART, REW, FFT-аналізаторів).

Ступінь наукової розробленості проблеми

Проблематика формування звукового середовища в різних просторових умовах має значну історію наукових досліджень. У класичних працях Гельмгольца, Сабіна, Кнутсена та Бернека закладено основи фізики звуку, поведінки хвиль у приміщеннях, ревербераційних процесів та впливу геометрії простору на акустичні властивості.

Вагомий внесок у розвиток дисципліни зробили дослідження з психоакустики, які пояснюють механізми сприйняття звуку людиною: явища маскування, локалізацію джерел, роль ранніх і пізніх відбиттів, часову інтеграцію слухових сигналів.

У сфері електроакустики значна увага приділяється характеристикам гучномовців, побудові масивів line array, управлінню спрямованістю та частотно-фазовою поведінкою систем.

З розвитком цифрових технологій активного поширення набули програмні методи моделювання:

- MAPP 3D,
- EASE,

- СATT-Acoustic,
- AFMG SoundFlow, які дозволяють прогнозувати розподіл звукового поля у тривимірному середовищі.

Сучасні системи аналізу — SMAART, Room EQ Wizard, FFT-аналізатори — надали можливість точного частотного, амплітудного та фазового контролю звукових систем.

Однак у науковій літературі відсутнє комплексне дослідження, яке інтегрує:

- фізичні закономірності поширення звуку;
- акустичні властивості приміщень і відкритих просторів;
- інженерні принципи побудови звукових систем;
- математичне моделювання звукових полів;
- сучасні технології вимірювання;
- психоакустичні критерії сприйняття.

Більшість наявних робіт розглядає лише окремі аспекти — акустичне моделювання, психоакустичні явища, параметри гучномовців, роботу delay-систем або обробку сигналів — без створення узагальненої теоретичної моделі, яка б описувала комплексну природу акустичних проблем у масових заходах.

Таким чином, дослідження заповнює суттєву наукову прогалину, обґрунтовуючи необхідність інтегрального підходу до аналізу звукових систем.

Наукова новизна

Наукова новизна полягає у комплексному підході до вирішення акустичних проблем на масових заходах, що поєднує фізичні, технічні та психоакустичні аспекти формування звукового середовища.

У роботі вперше систематизовано параметри оцінки акустичної ефективності концертних систем у змінних просторових умовах; розроблено структурну модель інтеграції вимірювальних програмних засобів із практичним

налаштуванням звукових систем; сформульовано рекомендації для поєднання архітектурних, технічних і слухових методів контролю якості звуку.

Практичне значення результатів дослідження

Результати можуть бути використані:

- у підготовці фахівців зі звукорежисури;
- під час викладання дисциплін «Теорія звуку», «Технологія звукопідсилення», «Практикум звукорежисера»;
- у подальших наукових дослідженнях звукорежисури та акустики;
- при створенні математичних моделей звукових систем;
- для обґрунтування стандартів проектування звукових систем у складних акустичних середовищах.

Матеріали дослідження застосовні у плануванні, налаштуванні та реалізації звукових систем для концертів, конференцій, презентацій, виставкових і культурних подій у різних акустичних середовищах

Апробація результатів дослідження. Основні результати дослідження обговорювались на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Діяльність продюсера в культурно-мистецькому просторі ХХІ століття : креативність, технології, конструктивізм.

Публікація. Журко Є.Д. Акустичні виклики та рішення для великих масових заходів: Роль звукорежисера у забезпеченні якісного звуку/Упор., наук. ред., відп. за вип.: С.Садовенко. Київ.НАКККиМ, 2025. С. 362-364 412с.

Структура роботи

Магістерська кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків, що містять акустичні схеми, графіки вимірювань і фотографії з реальних подій. Обсяг основного тексту становить 77 сторінок.

Робота має теоретичну й прикладну значущість, оскільки вперше системно описує практичне поєднання програмного моделювання, вимірювань та творчих рішень звукорежисера у сфері великих масових заходів.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИРОДНІ ЗАСАДИ АКУСТИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА МАСОВИХ ЗАХОДІВ

1.1 Огляд літератури за темою «Класичні та фундаментальні праці з акустики»

Проблематика формування акустичного середовища та оптимізації звукових систем у масових просторах представлена значною кількістю наукових, технічних та інженерних джерел. Однак більшість праць розглядає лише окремі аспекти акустичних явищ — фізичний, архітектурний, електроакустичний або психоакустичний — без створення комплексної моделі, яка враховувала б усі взаємопов'язані фактори. Саме це зумовлює необхідність систематизувати літературу за ключовими науковими напрямками:

1. Класичні та фундаментальні праці з акустики

Істотний внесок у розвиток теорії акустики зробили фундаментальні дослідження, які стали базою для сучасного аналізу звукових процесів.

- Беранек [1] є одним з основоположників архітектурної акустики. Він описав взаємозв'язок геометрії залів, матеріалів, об'єму та часу реверберації. Його підходи важливі для розділу 2.2, де аналізується ревербераційний баланс у складних просторах.
- Автори досліджень у [2] теоретично описують природу звукових полів, включаючи когерентність хвиль та дифузію енергії. Їхні моделі використовуються у розділі 2.1 при вивченні рівномірності розподілу звукового тиску.
- Баррон [3] розробив теорію ранніх та пізніх відбиттів, підкресливши їхню роль у чіткості звуку. Це безпосередньо пов'язано з проблемами відбиттів, розглянутих у розділі 2.2.
- Куттруфф [4] створив статистичні та геометричні моделі акустики приміщень, що дозволяють прогнозувати енергетичний розподіл у просторі. Ці моделі використовуються при аналізі у розділі 3.4.

- Лонг [5] досліджував вплив матеріалів на поглинання та розсіювання звуку. Він визначив важливі критерії вибору поверхонь для контролю реверберації, що узгоджується з розділом 2.2.
- Енциклопедичне джерело [6] систематизує міжнародні стандарти SPL, RT60, STI, що складає основу для методів оцінювання, описаних у розділі 1.7. 3.5.
- Авторами Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V. [7] сформульовано універсальні хвильові закони, що застосовуються при теоретичному аналізі стоячих хвиль та інтерференцій (див. розділ 2.3).
- Морс і Інгард [8] подали математичні рівняння хвильового поля, резонансів та дифракції. Ці моделі — фундамент для аналізу інтерференції у розділі 2.3 і процесів моделювання у розділі 3.5.

Ці праці становлять фундамент теоретичного аналізу й використовуються як база для математичного опису акустичних систем.

2. Психоакустика

Оскільки акустичні аномалії впливають не лише на фізичні параметри, але й на слухове сприйняття, важливо врахувати психоакустичний аспект.

- Блаурт [9] дослідив локалізацію джерел, міжвушну різницю фаз і амплітуд, що пояснює втрату просторової цілісності при фазових порушеннях (див. розділ 2.3. 2.6).
- Автори Everest, F. A., & Pohlmann, K. C. [10] описують методи корекції акустичних просторів, які враховують особливості слухового сприйняття та явище маскування (див. розділ 2.2, 2.6).
- Праці Howard, D., & Angus, J. [18] розкривають механізми розбірливості мовлення, оцінки STI, часової інтеграції та когнітивного навантаження слухача, що використовується у розділі 2.4, 2.6.

3. Сучасні дослідження у сфері звукоорежисури та електроакустики

- Пітер Ньюелл [11] описує акустичну взаємодію між гучномовцем та приміщенням і подає теоретичні принципи усунення флатер-ехо, ранніх відбиттів та мод приміщення. Це важливо для розділу 2.2.
- Рамсі й МакКормік [12] розглядають вплив акустики на результати мікшування, підкреслюючи значення ранніх відбиттів і часових зсувів. Цей матеріал частково застосовується у розділі 2.4.
- У Huber, D. M., & Runstein, R. E. [13] детально описано цифрову обробку сигналів та фазову корекцію, включаючи алгоритми DSP, що використовуються при налаштуванні delay-систем (див. розділ 3.3).
- Флойд Тул [14] досліджує взаємодію слухача, приміщення та гучномовців, що є ключовим у розумінні ефектів нерівномірності поля (див. розділ 2.1).
- Джон Іргл [15] систематизує техніки мікрофонування та описує фазові співвідношення між джерелами.
- Ballou, G. [17] охоплює електроакустику, маршрутизацію, моніторинг та принципи побудови складних звукових систем.
- Автори Howard, D., & Angus, J. [18] пояснюють, як фізичні параметри хвиль співвідносяться зі слуховим сприйняттям.
- У дослідженні Beranek, L [19] розглянуто характеристики понад ста концертних залів, що демонструє значення геометрії у формуванні відбиттів, порівнявши геометрію та показники реверберації (див. розділ 2.2).

4. Нормативні документи та міжнародні стандарт

Міжнародні документи:

- **ISO 3382** [20] — стандарти вимірювання RT60, C50, D50;

- IEC 60268-16:2020 [21]. Стандарт визначає методику вимірювання розбірливості мовлення (Speech Transmission Index).
- IEC 61672 [22] — вимоги до SPL-метрів (див. розділ 3.1);
- ITU-R BS.1770 [23] — LUFS алгоритм;
- EBU R128 [24] — нормалізація гучності;
- IEC 60268-4 [25] — методи вимірювання максимальної потужності гучномовців;
- AES3 [26] — передача аудіосигналів.

Вони формують теоретичну основу для методів оцінювання та вимірювання, описаних у розділі 3.1.

5. Програмні засоби вимірювання та моделювання

- MAPP 3D [27] — система прогнозування SPL, фазової когерентності та взаємодії елементів масиву (див. розділ 3.5).
- SMAART [28] — FFT-аналіз, імпульсні характеристики, фазові вимірювання.
- REW [29] — RT60, моди простору.
- ArrayCalc та документація d&b [30; 45] — теорія line array.
- Ui24R [31] — структурні DSP-рішення (див. розділ 3.3).
- Shure EW-D [32; 46] — алгоритми цифрових бездротових систем.
- Yamaha [47] — Dante, мережеві протоколи AES67.

6. Спеціалізовані джерела з теорії звукових масивів

- Christian Heil (L-Acoustics) [48] — автор теорії Wavefront Sculpture Technology; його роботи пояснюють принципи формування хвильового фронту масиву (див. розділ 3.3).
- Hill, Salter, Murphy [49] — теорії сабвуферних кардіоїдних та енд-файр масивів, що використовуються при аналізі низькочастотної спрямованості (див. розділ 3.3)

7. Новітні технічні та освітні платформи

- Meyer Sound [43],

- SMAART [44],
- d&b [45],
- Shure [46],
- Yamaha [47] публікують матеріали з теорії DSP, моделювання та спрямованості систем.

Усі згадані автори розглядають окремі аспекти акустики — фізику хвильових процесів, архітектурні відбиття, психоакустичне сприйняття, DSP, line array або стандарти. Проте жодне з джерел не подає інтегрованої теоретичної моделі, яка б системно пояснювала природу акустичних проблем масових заходів. Саме це визначає наукову новизну даної роботи та необхідність теоретичного узагальнення у розділах 2 і 3.

1.2. Поняття та класифікація масових заходів з позицій звукорежисури

Масові заходи у сучасному соціокультурному просторі є важливою формою публічної комунікації, в якій поєднуються художні, технічні, організаційні та інформаційні елементи. У контексті звукорежисури масовий захід розглядається як складна акустична система, що включає джерела звуку (виконавців, ведучих, інструменти), систему звукопідсилення, просторове середовище (відкрите або закрите) та аудиторію як кінцевого споживача звукової інформації.

Поняття «масовий захід» охоплює широкий спектр подій — від концертів, фестивалів, театралізованих вистав і церемоній до конференцій, форумів, презентацій і спортивних подій. Незважаючи на різну тематику та цільову аудиторію, усі ці заходи об'єднує потреба у створенні якісного акустичного простору, який забезпечує рівномірне, збалансоване й комфортне звучання для великої кількості слухачів.

Звукорежисер у межах масового заходу виступає координатором процесу акустичної взаємодії між технічними засобами та публікою. Його завдання полягає не лише у відтворенні звуку, але й у його формуванні відповідно до особливостей простору, характеру події, тембрової палітри, динамічного

діапазону та очікувань аудиторії. Таким чином, звукорежисура у сфері масових заходів має подвійний характер: з одного боку — технічний, пов'язаний із налаштуванням і корекцією звуку, з іншого — художньо-комунікативний, спрямований на створення емоційного враження та підтримку змісту події.

Класифікація масових заходів з точки зору звукорежисури здійснюється за низкою критеріїв, серед яких: тип акустичного простору, кількість учасників, формат звукового супроводу, ступінь інтерактивності та технічна складність.

1. За типом акустичного середовища розрізняють:

1. «відкриті простори» (площі, стадіони, парки, фестивальні майданчики), де головною проблемою є не контроль реверберації, а забезпечення рівномірного звукового поля за допомогою delay-зон і правильного розміщення систем;
2. «закриті простори» (концертні зали, конференц-холи, театри, павільйони), де головним викликом є боротьба з відбиттями, стоячими хвилями, флатер-ехо та надмірною реверберацією;
3. «комбіновані середовища» (наметові павільйони, сцени з відкритим фасадом, виставкові центри), які поєднують ознаки двох попередніх типів і потребують індивідуальних рішень щодо розміщення акустичних систем.

2. За кількістю учасників та аудиторії виділяють:

1. «малі заходи» (до 200 осіб), де звукопідсилення має здебільшого локальний характер і виконує функцію корекції природного звуку;
2. «середні заходи» (200–1000 осіб), які вимагають точнішого балансування системи, використання підзон або моніторних ліній;
3. «великі заходи» (понад 1000 осіб), де основним завданням є рівномірність розподілу звукового тиску (SPL) та синхронізація сигналів між різними акустичними зонами.

3. За функціональною спрямованістю масові заходи поділяються на:

1. «музично-сценічні» (концерти, фестивалі, шоу-програми), у яких домінує естетичний компонент і вимоги до точності передачі звуку;
 2. «мовно-комунікативні» (конференції, форуми, презентації), де першочерговим є показник розбірливості мовлення (Speech Transmission Index – STI);
 3. «змішані» (корпоративні заходи, гала-вечори, урочисті події), які потребують універсального підходу до акустичного балансу.
4. За форматом звукового супроводу виділяють:
1. «монофонічні системи» (переважно для мовлення або локальних виступів);
 2. «стереофонічні системи» (основний формат для більшості концертних заходів);
 3. «мультимедійні та просторові системи» (surround, immersive sound, L-ISA, Dolby Atmos Live), що використовуються на масштабних подіях для створення ефекту повного занурення у звукове середовище.
5. За рівнем технічної складності масові заходи поділяються на:
1. «локальні» (із мінімальною кількістю технічних компонентів — один мікшер, дві акустичні системи, обмежене оброблення сигналу);
 2. «багатоканальні системи середнього рівня», що включають цифровий мікшер, кілька delay-зон і моніторні лінії;
 3. «високотехнологічні комплекси», побудовані на базі цифрових мереж (Dante, AVB, NDI), із дистанційним керуванням, синхронізацією часу та програмним контролем якості звуку.

З погляду звукорежисури, кожен масовий захід є системою взаємодії між фізичним простором, технічними засобами та слухачами. Завдання фахівця полягає в оптимізації цієї взаємодії, забезпеченні точності передачі звукової інформації, контролі за динамічним діапазоном, відсутністю спотворень і

досягненні максимальної виразності звучання. Ключовим принципом сучасного підходу є інтеграція акустичних і електроакустичних рішень, що дозволяє створити єдиний акустичний простір незалежно від масштабу чи типу заходу.

Таким чином, класифікація масових заходів з позицій звукорежисури є основою для подальшого аналізу їхніх акустичних умов і визначення засобів ефективного вирішення проблем, що виникають під час їхнього проведення.

1.3. Акустичне середовище: властивості, просторові параметри та фізичні закони поширення звуку

Акустичне середовище є сукупністю просторових і матеріальних умов, у яких відбувається поширення, відбиття, поглинання та сприйняття звукових хвиль. Для масових заходів воно виступає ключовим чинником, що визначає якість звукового сприйняття, рівень комфорту слухача та ефективність роботи звукорежисера. Звук у будь-якому середовищі є фізичним коливанням частинок, яке поширюється у вигляді хвильових процесів. Для розуміння специфіки акустичних проблем на масових заходах необхідно детально розглянути властивості звуку та закономірності його поширення в просторі.

Основними характеристиками звукової хвилі є частота, амплітуда, довжина хвилі, фаза та швидкість поширення.

Частота визначає висоту звуку і вимірюється в герцах (Гц). Амплітуда характеризує силу коливань і безпосередньо впливає на рівень звукового тиску (Sound Pressure Level — SPL), який вимірюється в децибелах (дБ). Довжина хвилі залежить від частоти та швидкості звуку за формулою $\lambda = v / f$, де v — швидкість поширення звуку, f — частота. Час, за який звукова хвиля проходить один повний цикл своїх коливань, називається періодом і позначається T ; між періодом і частотою існує обернений зв'язок $f = 1 / T$.

У найпростішому випадку коливання описуються синусоїдальною хвилею, яка є базовою моделлю для аналізу більш складних звукових сигналів. Будову синусоїдальної хвилі та її основні параметри схематично показано у додатку 1 (див. Додаток 1)

Фаза описує положення хвилі у певний момент часу і визначає, у якій точці циклу вона перебуває.

Саме від фазових співвідношень залежать явища інтерференції та фазового зсуву, що часто викликають спотворення звукової картини у великих просторах. Фазовий зсув між двома синусоїдальними сигналами зазвичай вимірюється в градусах ($0-360^\circ$) і показує, наскільки один сигнал «випереджає» або «відстає» від іншого у часі. Для опису гармонічного сигналу часто використовують узагальнений вираз $p(t) = P \cdot \sin(2\pi ft + \varphi)$, де $p(t)$ — миттєве значення звукового тиску, P — амплітуда, f — частота, φ — фазовий зсув. Реальні звукові сигнали (наприклад, мова або музика) можуть розглядатися як сума великої кількості синусоїдальних компонентів різної частоти, амплітуди та фази, що лежить в основі методів спектрального аналізу.

Швидкість звуку в повітрі за нормальних умов ($t = 20^\circ\text{C}$, $p = 1\text{ атм}$) становить приблизно 343 м/с . Цей показник залежить від температури, вологості, щільності середовища та висоти над рівнем моря. Для технічних розрахунків у повітрі часто використовують наближену формулу $v \approx 331 + 0,6 \cdot t$, де t — температура в $^\circ\text{C}$. Підвищення температури або вологості збільшує швидкість звуку, що особливо важливо враховувати під час відкритих заходів, де акустичне середовище змінюється залежно від погодних умов.

Звукове поле в акустичному середовищі може бути дифузним або спрямованим. У дифузному полі звукова енергія рівномірно розподілена в усіх напрямках, тоді як у спрямованому — домінує певний вектор поширення хвиль, зумовлений конструкцією джерела або архітектурою простору. Для масових заходів особливо важливим є формування контрольованого спрямованого звукового поля, яке забезпечує рівномірний розподіл енергії в зоні слухачів. Це досягається за допомогою відповідних характеристик гучномовців і конфігурацій масивів випромінювачів. Водночас надмірна спрямованість може призвести до акустичних «тіней» — ділянок простору з недостатнім рівнем гучності.

Основні фізичні процеси, які визначають поведінку звуку в середовищі, — це відбиття, поглинання, дифракція, інтерференція та розсіювання. Відбиття виникає, коли звукова хвиля зустрічає перешкоду з високою акустичною жорсткістю. Кут падіння дорівнює куту відбиття, але на практиці цей процес ускладнюється нерівностями поверхонь, складною геометрією приміщення та різними коефіцієнтами поглинання. Поглинання звуку пов'язане з перетворенням частини звукової енергії в теплову і залежить від матеріалу поверхонь. Пористі матеріали (вата, тканина, пінополіуретан) мають високий коефіцієнт поглинання, тоді як тверді поверхні (бетон, скло, метал) — низький.

Схематичне зображення основних процесів відбиття, поглинання, дифракції та інтерференції наведено у додатку 2 (*див. Додаток 2*).

Інтерференція є результатом накладання кількох звукових хвиль, що може спричинити підсилення або ослаблення сигналу. Це явище особливо помітне у великих приміщеннях або на відкритих просторах, коли кілька джерел випромінюють звук з невеликими часовими зсувами. Так званий «ефект гребінки» (comb filtering) виникає при зміщенні фаз між хвилями, що веде до періодичних провалів та підсилень у частотному спектрі сигналу. Ступінь вираженості цих провалів залежить від різниці ходу Δt між сигналами: чим менший часовий зсув, тим щільніше розташовані піки й западини в спектрі. Фазовий зсув θ між двома сигналами можна оцінити за співвідношенням $\theta = 360^\circ \cdot \Delta t / T$.

Дифракція — це огинання хвилею перешкод і розповсюдження звуку за їх межі. Вона забезпечує чутність джерела навіть за відсутності прямої видимості, але водночас може призводити до небажаних ревербераційних ефектів і розмиття локалізації. Розсіювання звуку відбувається на нерівностях поверхні, сприяючи формуванню дифузного звукового поля. Правильне поєднання відбивних і поглинальних матеріалів, а також елементів дифузії дозволяє контролювати цей процес, досягаючи природного звучання без акустичних артефактів.

Одним із базових законів акустики є «закон обернених квадратів», згідно з яким інтенсивність звуку зменшується пропорційно квадрату відстані від

джерела, тобто збільшення відстані вдвічі призводить до зменшення рівня звуку приблизно на 6 дБ. У контексті масових заходів це означає необхідність ретельного планування системи звукопідсилення для компенсації втрат енергії, особливо у великих залах або відкритих просторах. Використання розподілених систем і delay-зон дає змогу мінімізувати ці втрати та забезпечити більш рівномірний розподіл SPL по всій площі аудиторії.

Ще одним важливим параметром є час реверберації (RT60) — проміжок часу, за який рівень звуку в приміщенні зменшується на 60 дБ після припинення роботи джерела. Цей показник використовується для оцінки акустичної якості приміщень. У концертних залах оптимальний RT60 становить орієнтовно 1,5–2,0 с, у конференц-залах — 0,8–1,2 с, у студіях — не більше 0,5 с. Для відкритих просторів реверберація практично відсутня, тому ефект простору формується переважно за рахунок електронної обробки сигналу — ревербераторів і просторових ефектів.

На формування акустичного середовища впливають також метеорологічні фактори: температура, вологість, напрямок і швидкість вітру. Під час відкритих заходів вітер може змінювати напрям поширення хвиль, а температурна стратифікація призводить до заломлення звуку, що впливає на сприйняття гучності в різних зонах. Тому акустичне проектування відкритих подій має враховувати метеорологічні умови та передбачати можливість адаптивного налаштування системи.

Акустичне середовище масового заходу є багатовимірною системою, в якій взаємодіють фізичні, технічні та просторові чинники. Розуміння основних властивостей і законів поширення звуку є необхідною передумовою для ефективного вирішення акустичних проблем і створення оптимального звукового простору під час будь-яких подій.

Для усунення інтерференційних артефактів у системах звукопідсилення використовують затримки сигналу (delay lines) і фазові корекції в цифрових процесорах.

1.4. Характеристика типових акустичних просторів (відкриті, закриті, комбіновані)

Поняття акустичного простору охоплює сукупність архітектурних, матеріальних і просторових характеристик, які визначають умови поширення звуку в певному середовищі. Для звукорежисера важливо не лише розуміти закони поширення звуку, а й уміти адаптувати технологічні засоби звукопідсилення відповідно до властивостей конкретного простору, у якому відбувається масовий захід.

Умовно всі акустичні простори поділяються на три основні типи: відкриті, закриті та комбіновані. Кожен із них має власну структуру звукового поля, рівень реверберації, поглинання, відбиття та розсіювання звукових хвиль. Саме від типу простору залежить стратегія розміщення акустичних систем, вибір мікрофонів, а також застосування цифрових ефектів.

Відкриті акустичні простори — це середовища без значних обмежувальних поверхонь, у яких звук поширюється вільно в усіх напрямках. До таких належать площі, стадіони, парки, відкриті сцени, вуличні фестивальні майданчики. Основною перевагою відкритого простору є відсутність ревербераційних ефектів, що дозволяє забезпечити високу чіткість звучання. Однак при цьому виникають інші проблеми — нерівномірність розподілу рівня звуку на великих відстанях, залежність якості звучання від погодних умов (вітру, вологості, температури) та необхідність компенсації енергетичних втрат. У таких умовах широко застосовуються лінійні масиви (line array), delay-зони, а також системи керованої спрямованості (steerable arrays), які дозволяють точно контролювати покриття звуковим полем.

Закриті простори характеризуються наявністю обмежувальних поверхонь-стін, стелі та підлоги, які істотно впливають на відбиття й поглинання звукових хвиль. До цього типу належать концертні та театральні зали, клуби, конференц-холи, записувальні студії, павільйони. У таких середовищах головною проблемою є контроль реверберації та відбиттів. Занадто довгий час реверберації

(RT60) призводить до зниження розбірливості звуку, тоді як короткий — робить звучання «сухим» і невиразним.

Важливу роль відіграють матеріали поверхонь:

1. деревина створює м'яке,
2. тепле звучання;
3. бетон і скло — жорстке, холодне;
4. тканини та акустичні панелі забезпечують збалансоване поглинання у середньочастотному діапазоні.

У великих залах звукорежисер повинен враховувати ранні відбиття, що формують перше враження слухача, і пізні відбиття, які впливають на сприйняття простору.

Особливу увагу в закритих просторах приділяють розташуванню джерел звуку та акустичних систем. Неправильне позиціонування призводить до появи «мертвих зон» або локальних підсилень у певних частотних діапазонах. Оптимізація досягається за допомогою систем фазового вирівнювання, акустичного моделювання та використання цифрових процесорів, що дозволяють компенсувати вплив геометрії приміщення.

Комбіновані акустичні простори поєднують риси відкритих і закритих середовищ. Це можуть бути сцени з навісами, виставкові павільйони зі скляними або тканинними перегородками, наметові конструкції, літні театри. Такі простори створюють значні виклики для звукорежисера через неоднорідність акустичних властивостей. Частина звукової енергії відбивається від поверхонь, інша — втрачається у відкритому повітрі. Тому важливо забезпечити рівновагу між прямим і відбитим звуком, уникати фазових конфліктів між основною системою та моніторами.

Для комбінованих просторів характерна часткова реверберація з різними часовими затримками, що утворюють складне звукове поле. У таких умовах звукорежисер повинен проводити ретельне тестування акустики за допомогою вимірювальних мікрофонів та аналізаторів (SMAART, Room EQ Wizard) для виявлення стоячих хвиль, піків і провалів частотного спектра. Використання

цифрових процесорів і систем delay-компенсації дозволяє створити стабільну акустичну картину навіть у неоднорідних середовищах.

Під час підготовки до масового заходу необхідно враховувати не лише тип простору, а й його місткість, геометрію, матеріали оздоблення, а також присутність аудиторії, яка також впливає на акустичні параметри (оскільки людське тіло поглинає частину звукової енергії). Усі ці фактори визначають вибір акустичного обладнання, розміщення систем, настройку рівнів та часових затримок. Ефективна робота звукорежисера вимагає поєднання теоретичних знань про акустику простору та практичних навичок адаптації до конкретних умов проведення заходу.

1.5. Архітектурно-матеріальні чинники, що впливають на формування звукового поля

Архітектурно-матеріальні чинники є одним із визначальних аспектів у процесі формування звукового поля. Кожне приміщення має власну акустичну ідентичність, яка залежить від його геометрії, об'єму, матеріалів оздоблення та розташування елементів, що взаємодіють із звуковими хвилями. Для звукорежисера знання цих особливостей є необхідною передумовою правильного проєктування систем звукопідсилення та досягнення збалансованого звучання.

Архітектурна форма приміщення визначає характер поширення звуку. У прямокутних залах спостерігається поява стоячих хвиль через паралельність поверхонь, що призводить до утворення зон підсилення та ослаблення звукового тиску. У приміщеннях із склепінчастими або купольними стелями відбувається фокусування звуку в певних точках простору, що може створювати небажані локальні піки гучності. Для уникнення таких ефектів архітектори застосовують непрямі кути, нерівні стелі, асиметричні конструкції, які сприяють рівномірному розсіюванню звуку. У великих концертних або театральних залах важливу роль відіграє пропорційність об'єму до площі сцени і глядацької зали, оскільки це визначає співвідношення між прямим і відбитим звуком.

Матеріали, з яких побудоване або оздоблене приміщення, формують його акустичні властивості через коефіцієнт звукопоглинання.

Коефіцієнт поглинання (α) вимірюється в межах від 0 до 1 і показує, яку частину звукової енергії поверхня поглинає, а яку — відбиває. Наприклад, бетон має $\alpha \approx 0,02$, скло — близько 0,05, деревина — 0,1–0,2, килим — 0,4–0,6, а акустична піна або мінеральна вата — понад 0,8.

Тверді поверхні майже повністю відбивають звук, тоді як м'які та пористі матеріали забезпечують ефективне поглинання, особливо у середньо- та високочастотному діапазоні.

Особливу роль відіграють акустичні панелі та дифузори, які призначені для контролю реверберації та покращення рівномірності звукового поля. Дифузори не поглинають звук, а рівномірно розсіюють його у просторі, зменшуючи концентрацію енергії у певних напрямках. Такі елементи часто розміщуються на задніх або верхніх стінах залів, щоб уникнути ефекту «луну» і зберегти природність звучання.

Геометричні параметри приміщення також мають вирішальний вплив на акустику. Високі стелі збільшують час реверберації, а вузькі й довгі зали створюють відчуття «тунельного» звуку. Ідеальним вважається співвідношення висоти, ширини та довжини залу близьке до золотого перетину (1 : 1,6 : 2,6), що мінімізує стоячі хвилі. Для великих об'єктів важливо забезпечити достатню дифузність звуку, щоб слухачі в різних точках простору отримували однакове акустичне враження.

Архітектурні елементи, такі як колони, балкони, перегородки, можуть створювати акустичні тіні або викликати фазові зсуви. Тому при плануванні системи звукопідсилення необхідно враховувати ці об'єкти як потенційні перешкоди. Розміщення джерел звуку повинно забезпечувати їхню пряму чутність для максимальної кількості слухачів. Застосування delay-зон дозволяє компенсувати акустичні відхилення, пов'язані з архітектурними особливостями залу.

Матеріальне середовище безпосередньо впливає на частотний баланс звуку. Поверхні, що поглинають високі частоти (килими, штори, тканини), зменшують яскравість звучання, тоді як тверді поверхні (бетон, гіпс, скло) можуть спричинити надмірну кількість високочастотних відбиттів. У таких випадках використовують комбіновані рішення — дифузійні панелі для високих частот і звукопоглинальні матеріали для низьких.

Для контролю низькочастотних резонансів встановлюються бас-пастки, які зменшують енергію хвиль довгої довжини.

Важливим чинником є наповненість приміщення людьми. Людське тіло та одяг мають помітний звукопоглинальний ефект, особливо у середньо частотному діапазоні. Залежно від кількості глядачів рівень реверберації може змінюватися на 0,3–0,6 секунди. Тому під час акустичних вимірювань або моделювання необхідно враховувати реальне навантаження залу, щоб налаштування системи відповідало умовам фактичного проведення заходу.

Вибір матеріалів під час будівництва або реконструкції залів має ґрунтуватися на поєднанні естетичних і акустичних вимог. Архітектурне рішення не повинно суперечити завданню досягнення якісного звучання.

Наприклад, скляні елементи, що додають візуальної легкості, потребують компенсації у вигляді поглинаючих панелей, а великі площини деревини часто комбінують із дифузійними структурами.

Сучасні акустичні проекти базуються на принципі інтеграції архітектури та звуку — коли простір спроектований одразу з урахуванням акустичних властивостей матеріалів і їхнього впливу на звук.

Таким чином, архітектурно-матеріальні чинники є фундаментом акустичного дизайну будь-якого масового заходу. Від поєднання геометрії, матеріалів і просторових характеристик залежить рівномірність звукового поля, розбірливість, комфортність та виразність звучання, що безпосередньо визначає успіх роботи звукорежисера.

1.6. Основні принципи акустичного проектування сценічних та глядацьких просторів

Акустичне проектування сценічних і глядацьких просторів є комплексним процесом, що поєднує наукові, інженерні та художні підходи до створення оптимального звукового середовища.

Основна мета такого проектування полягає у забезпеченні рівномірного розподілу звуку, належної розбірливості мовлення, адекватного рівня гучності та природності звучання незалежно від місця розташування слухача.

Ключовим принципом сучасного акустичного проектування є баланс між прямим і відбитим звуком. Прямий звук створює відчуття чіткості та присутності, тоді як відбитий формує відчуття простору і глибини. Надлишок реверберації може розмити мовну чіткість, тоді як її нестача робить звучання «плоским».

Оптимальне співвідношення досягається шляхом точного розрахунку часу реверберації (RT60), вибору матеріалів поверхонь і правильного розміщення акустичних систем.

Проектування сценічного простору передбачає аналіз параметрів джерела звуку та його взаємодії з залом. Розташування сцени, висота подіуму, орієнтація виконавців і форма порталів безпосередньо впливають на напрям поширення звукових хвиль. У театральних та концертних умовах часто використовуються спеціальні акустичні щити або відбивачі, які дозволяють направити звук у глядацьку зону без втрат енергії. Для великих сцен рекомендується застосування багаторівневих систем відбиття, що сприяють рівномірному охопленню аудиторії.

Особлива увага приділяється розташуванню глядацьких місць. Форма залу визначає рівномірність звукового покриття — традиційно віддають перевагу трапецієподібній або віялоподібній конфігурації, яка забезпечує мінімальну різницю у часі прибуття звукових хвиль до передніх і задніх рядів. Важливими параметрами є кут нахилу підлоги, висота сидінь і наявність звукопоглинальних матеріалів у кріслах. Розрахунок зон покриття проводиться за допомогою

комп'ютерних моделей у програмах MAPP 3D, EASE, або AFMG SoundFlow, що дозволяє передбачити акустичну поведінку простору ще на етапі проектування.

У процесі розробки акустичного проєкту враховуються три основні типи звукових полів: пряма зона, зона ранніх відбиттів та ревербераційна зона. У прямих зонах звук надходить безпосередньо від джерела, у зоні ранніх відбиттів від поверхонь сцени, стін або стелі, а у ревербераційній зоні переважають багатократні відбиття.

Завдання проєктувальника — досягти гармонійного поєднання цих компонентів, при якому слухач сприймає звук як цілісний, об'ємний і природний. Для цього використовуються архітектурні рішення, що сприяють дифузності звукового поля — наприклад, розсіювальні панелі, нерівні стелі або декоративні структури зі змінною глибиною.

У відкритих просторах (фестивалі, концерти, спортивні арени) основна увага приділяється напрямленості звуку та компенсації втрат енергії. Закон обернених квадратів, за яким гучність зменшується на 6 дБ при подвоєнні відстані, визначає необхідність використання delay-зон або лінійних масивів. Такі системи дозволяють рівномірно розподілити звуковий тиск на всій площі майданчика, а також забезпечити фазову синхронізацію сигналу між різними зонами. Важливим завданням є також запобігання звуковим перешкодам і відбиттям від навколишніх будівель чи об'єктів.

Одним із принципів ефективного проєктування є оптимізація співвідношення між потужністю акустичної системи та акустичними властивостями простору. Недостатня потужність призводить до нерівномірного покриття і втрати динаміки, а надмірна — до появи спотворень і перевантаження приміщення енергією низьких частот. Збалансована система повинна забезпечувати середній рівень звукового тиску у межах 85–95 дБ SPL для концертних заходів і 70–80 дБ SPL для мовних подій, з урахуванням нормативів безпеки слуху.

У великих просторах важливим аспектом є забезпечення часової когерентності сигналу. Якщо звук із різних джерел або delay-зон надходить до

слухача з відставанням понад 20 мс, виникає спотворення звукового образу. Тому всі системи повинні бути синхронізовані через цифрові процесори із точністю до мілісекунди. Сучасні технології (Dante, AVB, AES67) забезпечують передачу аудіосигналів у мережах із мінімальними затримками, що є важливим для акустичного узгодження великих об'єктів.

У глядацьких просторах велике значення має контроль низькочастотного діапазону. Надлишок низьких частот може спричинити резонанс або «бубніння» залу, тому акустичні проекти включають використання сабвуферів із кардіоїдною або ендфайр-конфігурацією, які зменшують зворотне випромінювання і концентрують енергію у напрямку аудиторії. Водночас необхідно зберегти природну передачу тембрової палітри, що досягається завдяки точному налаштуванню кросоверів і фазових зсувів.

Таким чином, акустичне проектування сценічних та глядацьких просторів базується на поєднанні архітектурних, технічних і психоакустичних принципів. Гармонійне узгодження геометрії простору, матеріалів, напрямленості джерел і цифрового контролю дозволяє досягти високої якості звукового відтворення, що є необхідною умовою успішного проведення масових заходів. Детальніше можна ознайомитись у додатку 3 (*див. Додаток 3*)

1.7. Сучасні методи вимірювання та аналізу параметрів звуку (SPL, RT60, STI, FFT)

Сучасна професійна звукорежисура спирається на точні вимірювання параметрів звуку, які дозволяють оцінити якість акустичного середовища, виявити проблемні ділянки звукового поля та забезпечити оптимальні умови для відтворення аудіоматеріалу. Основними показниками, що підлягають вимірюванню під час акустичного аналізу, є рівень звукового тиску (SPL), ревербераційний час (RT60), індекс розбірливості мовлення (STI) та спектрально-часові характеристики сигналу, визначені за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT). Ці параметри становлять фундамент для об'єктивної оцінки якості звукового середовища та управління ним.

Першим базовим параметром є **SPL (Sound Pressure Level)** — рівень звукового тиску. Він вимірюється у децибелах (дБ) і визначає силу акустичного сигналу у певній точці простору. SPL дозволяє оцінити рівномірність розподілу гучності в аудиторії та встановити баланс між зонами прямого і відбитого звуку.

У системах звукопідсилення вимірювання SPL є основним критерієм налаштування delay-зон, лінійних масивів та моніторів. Для практичних вимірювань використовуються калібровані мікрофони класу 1 (наприклад, Earthworks M23) у поєднанні з програмами SMAART, Room EQ Wizard або NTi XL2, що дозволяють аналізувати частотний розподіл звукового тиску у реальному часі.

Другим важливим параметром є **RT60 (Reverberation Time)** — ревербераційний час, або проміжок часу, за який рівень звукового тиску знижується на 60 дБ після припинення джерела звуку. Цей показник характеризує здатність простору зберігати енергію звукових хвиль і є визначальним для акустичного комфорту слухача. Занадто короткий RT60 призводить до «сухого» звуку без об'єму, тоді як надмірно тривалий час реверберації викликає нечіткість і втрату розбірливості.

У концертних залах рекомендовані значення RT60 становлять 1,2–1,8 с, для лекційних приміщень — 0,5–0,8 с. Вимірювання здійснюються за допомогою тестових сигналів — імпульсного шуму або свіп-тесту (sine sweep), а аналіз результатів проводиться програмами EASERA, REW або ARTA, які дозволяють визначити частотну залежність реверберації.

Наступним критичним параметром є «**STI (Speech Transmission Index)**» — індекс розбірливості мовлення. Він відображає ступінь зрозумілості мовного сигналу в конкретному акустичному середовищі та залежить від співвідношення прямого і відбитого звуку, а також від рівня фонових шумів. STI обчислюється шляхом аналізу модуляційної передавальної функції системи, що показує, наскільки точно передаються динамічні зміни мовного сигналу у часі. Показник STI варіюється від 0 (повна нерозбірливість) до 1 (ідеальна розбірливість). Для якісного публічного мовлення бажано досягти значень не нижче 0,6–0,7. Цей

параметр особливо важливий під час проектування конференц-залів, театрів і великих аудиторій.

Ключовим аналітичним інструментом сучасної акустики є «FFT (Fast Fourier Transform)» — швидке перетворення Фур'є. Цей метод дозволяє розкласти складний сигнал на окремі гармонійні складові та проаналізувати його частотну структуру. FFT використовується для побудови амплітудно-частотної характеристики (АЧХ), фазової характеристики та імпульсної відповіді системи.

На основі цих даних здійснюється еквалізація, фазова корекція та балансування систем звукопідсилення. Програми SMAART, SpectraFoo та FFT Analyzer дозволяють отримати реальний спектр звуку, що відтворюється у просторі, та визначити відхилення від лінійності у різних діапазонах частот.

У практиці звукорежисури вимірювання SPL, RT60, STI та FFT є невід'ємною частиною етапу підготовки до заходу. На основі цих параметрів приймаються рішення щодо розташування акустичних систем, налаштування еквалайзерів і балансування потужності. Завдяки сучасним цифровим технологіям та програмним інструментам аналіз параметрів звуку здійснюється у режимі реального часу, що дозволяє оперативно реагувати на зміну акустичних умов.

Отже, сучасні методи вимірювання та аналізу параметрів звуку формують наукову й практичну основу професійної звукорежисури. Вони забезпечують об'єктивність оцінки акустичного середовища, дозволяють здійснювати точне налаштування систем звукопідсилення та гарантують досягнення високої якості звуку у різних типах приміщень і умовах проведення масових заходів.

1.8. Особливості акустичного середовища як основи подальшого дослідження

Проведений аналіз дозволяє узагальнити основні закономірності формування акустичного середовища масових заходів та визначити чинники, які мають вирішальне значення для забезпечення якісного звукового сприйняття.

У першому розділі було розглянуто понятійно-термінологічну базу звукорежисури в контексті масових подій, фізичні основи поширення звуку, типологію акустичних просторів і вплив архітектурно-матеріальних характеристик на звукове поле. Ці положення становлять фундамент для подальших практичних розділів роботи, де буде проаналізовано типові акустичні проблеми та запропоновано методи їхнього усунення.

Масові заходи розглядаються як складні просторово-звукові системи, у яких взаємодіють три основні компоненти: джерело звуку, середовище поширення та слухач. Кожен із цих елементів формує власний внесок у кінцеве звучання. Звукорежисер виступає посередником між ними, здійснюючи контроль, корекцію й узгодження сигналу для досягнення оптимального балансу гучності, чистоти та просторовості. У цьому контексті акустичне середовище розглядається як динамічна система, що залежить від архітектурних, матеріальних, технічних і навіть метеорологічних факторів.

У результаті аналізу встановлено, що ключовими аспектами побудови якісного звукового простору є:

1. Розуміння фізичних властивостей звукової хвилі (частота, амплітуда, фаза, довжина хвилі) та законів її поширення у просторі.
2. Класифікація акустичних середовищ за типом (відкриті, закриті, комбіновані) та врахування специфіки кожного з них при розміщенні систем звукопідсилення.
3. Вплив архітектурних параметрів (форма, об'єм, пропорції) та матеріалів (коефіцієнт поглинання, дифузія, реверберація) на структуру звукового поля.
4. Необхідність точних вимірювань акустичних параметрів (SPL, RT60, STI, FFT) для створення об'єктивної картини простору й контролю якості звучання.
5. Використання сучасних програмних засобів (SMAART, Room EQ Wizard, MAPP 3D), які забезпечують високоточний аналіз і моделювання акустичного середовища.

Усі ці компоненти утворюють єдину методологічну базу для подальшого дослідження акустичних проблем, з якими стикаються фахівці під час проведення масових заходів. Побудова ефективної системи звукопідсилення неможлива без урахування комплексного впливу архітектурно-просторових та фізичних факторів. Розуміння цих взаємозв'язків є необхідною умовою професійної діяльності звукорежисера, оскільки саме від них залежить стабільність, чистота та виразність звукового образу.

Перший розділ магістерської роботи закладає теоретичну основу для переходу до практичної частини дослідження — аналізу типових акустичних проблем, що виникають під час масових заходів, і розробки ефективних технологічних рішень для їхнього усунення. Відтак, подальші розділи будуть спрямовані на деталізацію практичних аспектів роботи із системами звукопідсилення, вимірювальними технологіями та цифровими процесами, які дозволяють досягти високого рівня акустичного комфорту в різних просторових умовах.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТИПОВИХ АКУСТИЧНИХ ПРОБЛЕМ У ПРОСТОРАХ МАСОВИХ ЗАХОДІВ

2.1. Основні категорії акустичних спотворень і їх вплив на сприйняття звуку

Акустичні спотворення є одним із головних чинників, що знижують якість відтворення звуку під час масових заходів. Вони виникають унаслідок невідповідності між початковим аудіосигналом і тим, що в результаті досягає слухача. Будь-яка відмінність між переданим і сприйнятим сигналом у вигляді змін частотного складу, динамічного діапазону, фази або часової структури розглядається як форма спотворення.

Для професійної звукорежисури контроль таких відхилень має вирішальне значення, оскільки навіть незначні зміни можуть призвести до втрати природності звуку, появи шумів або зниження розбірливості.

Узагальнено акустичні спотворення поділяються на кілька категорій: амплітудні, фазові, спектральні, часові та просторові. Кожна з них має власну природу виникнення та різний ступінь впливу на сприйняття звукового образу.

Амплітудні спотворення пов'язані зі зміною рівня сигналу відносно його вихідної форми. Вони можуть виникати через перевантаження електронних компонентів, неправильне налаштування підсилювачів або компресорів, а також через нерівномірну характеристику підсилення системи.

Прикладом амплітудних спотворень є кліпінг (clipping), коли сигнал перевищує межу динамічного діапазону пристрою, що призводить до «зрізання» пікових значень і появи гармонічних обертонів. У результаті звук стає жорстким, неприємним і втрачає динамічну глибину (*див. Додаток 4*)

Фазові спотворення виникають тоді, коли окремі частотні компоненти сигналу зміщуються у часі відносно одна одної. Такі зміщення змінюють структуру хвильової форми і можуть призвести до ефекту гребінки (comb filtering), (*див. Додаток 5*), особливо у багатоканальних системах або при некоректній роботі delay-зон. Фазова невідповідність призводить до ослаблення

певних частот, втрати чіткості й «розмиття» звукового образу. Для компенсації цих спотворень використовуються фазові коректори, цифрові процесори із затримкою сигналу (delay alignment) та точна синхронізація каналів у цифрових мережах (Dante, AVB, AES67).

Спектральні спотворення пов'язані зі зміною частотного складу сигналу. Вони можуть бути спричинені як характеристиками акустичних систем (нерівномірною АЧХ), так і властивостями середовища — відбиттями, поглинанням або дифракцією звуку (див. Додаток 6). У результаті слухач сприймає звук із надмірним або недостатнім вмістом певних частот, що змінює його тембр. Для виправлення спектральних спотворень використовуються графічні та параметричні еквайзери, фільтри високих і низьких частот, а також системи автоматичного калібрування звуку. У практиці звукорежисера важливо враховувати, що людське вухо по-різному реагує на частоти залежно від рівня гучності, тому корекція має здійснюватися з урахуванням психоакустичних кривих Флетчера-Мансона (див. Додаток 7).

Часові спотворення — це відхилення, пов'язані зі зміною моменту надходження звукових сигналів до слухача. Вони виникають унаслідок різної відстані між акустичними джерелами, затримок у цифрових системах або відбиттів від архітектурних поверхонь. Якщо сигнал надходить із затримкою понад 20 мс, слухач сприймає його як окремий звук або відлуння. Часові зсуви також можуть призвести до фазових конфліктів і втрати просторової локалізації. Для компенсації застосовуються delay-процесори, які синхронізують усі джерела звуку, створюючи ілюзію єдиного акустичного простору.

Просторові спотворення пов'язані з нерівномірністю розподілу звукового тиску (SPL) у межах глядацької зали або відкритого майданчика. Вони виникають унаслідок неправильної орієнтації акустичних систем, відбиттів від стін і стелі, а також акустичних тіней, спричинених архітектурними перешкодами. У таких випадках слухачі в різних точках простору чують звук різної гучності або тембрового складу.

Для усунення просторових спотворень використовується моделювання звукового поля в програмах MAPP 3D або EASE, що дозволяє визначити оптимальне розташування систем і досягти рівномірного покриття звуком (див. Додаток 8)

Окрім цих основних категорій, до акустичних спотворень належать паразитні шуми (гул, фідбек, електричні перешкоди), інтермодуляційні спотворення (IMD), гармонічні (THD) та фазові перекручення. У професійних системах їхній рівень контролюється за допомогою вимірювальних приладів — аналізаторів спектру, осцилографів і програмних модулів. Коефіцієнт гармонічних спотворень (THD) у якісному обладнанні не перевищує 0,01%, що забезпечує чистоту звучання навіть при високих рівнях гучності.

Вплив акустичних спотворень на сприйняття звуку має не лише технічний, але й психоакустичний характер. Людське вухо здатне толерувати незначні спектральні зміни, проте чутливо реагує на фазові або часові невідповідності, які викликають відчуття дискомфорту, напруження або втрати просторової локалізації. Тому професійна робота звукорежисера полягає не лише у вимірюванні об'єктивних параметрів, а й у забезпеченні суб'єктивного акустичного комфорту для слухача.

Загалом акустичні спотворення є комплексним явищем, що поєднує фізичні, технічні й психоакустичні аспекти. Їхній аналіз та усунення становлять одну з найважливіших задач у підготовці до масових заходів, оскільки саме від чистоти, динаміки та стабільності звукового сигналу залежить сприйняття події аудиторією.

2.2. Основні категорії акустичних спотворень і їх вплив на сприйняття звуку

Однією з найпоширеніших акустичних проблем у середовищах проведення масових заходів є поява неконтрольованих відбиттів, реверберації та флатер-ехо. Ці явища є природними наслідками взаємодії звукових хвиль із поверхнями приміщення, але за відсутності відповідного контролю вони можуть істотно

погіршити якість звучання. Для звукорежисера розуміння природи цих процесів є необхідною умовою правильного налаштування системи звукопідсилення та оптимізації акустичного простору.

Відбиття звуку виникає тоді, коли звукова хвиля, досягнувши поверхні з високим коефіцієнтом відбиття (наприклад, стіни, скла або бетону), повертається у приміщення і взаємодіє з прямим сигналом. Якщо відстань між джерелом і відбивальною поверхнею становить кілька метрів, слухач може сприймати відбитий звук як окремий ехо-сигнал. У випадках, коли затримка між прямим і відбитим звуком менше 20 мс, сприйняття відбувається як розмиття сигналу, а не як окремий звук. Це призводить до зниження розбірливості мовлення та втрати чіткості музичного матеріалу (*див. Додаток 9, 10*)

Характер і кількість відбиттів залежать від геометрії приміщення, типу матеріалів і кута падіння звукових хвиль. У прямокутних залах, де стіни паралельні, відбиття мають спрямований характер і утворюють так звані стоячі хвилі. Це призводить до концентрації звукової енергії на певних частотах і створює нерівномірність звучання. Щоб уникнути цього, у сучасних акустичних проєктах застосовують нерівні поверхні, розсіювальні елементи та спеціальні панелі, що змінюють напрям поширення звуку.

Реверберація є більш складним явищем, що виникає внаслідок багатократних відбиттів звукових хвиль від різних поверхонь. Вона формує так зване ревербераційне поле, у якому звукова енергія поступово згасає після припинення джерела сигналу. Реверберація надає звуку природного об'єму й просторовості, однак її надмірність може значно знизити розбірливість.

Тривалість реверберації вимірюється параметром RT60 — часом, за який рівень звуку зменшується на 60 дБ. Оптимальні значення RT60 залежать від типу заходу: для мовних подій — до 1 с, для концертів — 1,5–2,0 с. Надлишкова реверберація спричиняє накладання сигналів у часі, що призводить до втрати контрастності та нечіткого звучання (*див. Додаток 11*)

Одним із найпроблемніших проявів неконтрольованих відбиттів є явище флатер-ехо (flutter echo). Це багаторазове коротке відбиття звуку між двома

паралельними поверхнями, яке створює характерне дзижчання або металевий відтінок звуку. Флатер-ехо особливо помітне при роботі з мікрофонами високої чутливості або при записі мовлення, оскільки воно викликає небажану модуляцію звукового сигналу. Для усунення цього ефекту застосовують нерівні або нахилені поверхні, звукопоглинальні панелі, а також комбіновані дифузійно-абсорбційні матеріали, що розсіюють звукову енергію в різних напрямках.

Відбиття, реверберація та флатер-ехо безпосередньо впливають на психоакустичне сприйняття звуку. Людський слух чутливий до часових зсувів між прямим і відбитим сигналом, тому навіть мілісекундні затримки можуть створювати відчуття віддаленості або розмитості. У концертних залах надлишок реверберації призводить до перевантаження слухового аналізатора, а у конференц-залах — до погіршення розбірливості мови. Оптимальний акустичний простір характеризується збалансованим співвідношенням прямого, ранніх і пізніх відбиттів, що забезпечує чіткість і природність звучання.

Для кількісної оцінки впливу відбиттів і реверберації застосовуються вимірювання імпульсної характеристики приміщення (Impulse Response) та аналіз параметрів C50 і D50 (*див. Додаток 12*), які показують частку енергії ранніх відбиттів у загальному сигналі. Під час налаштування звукових систем важливо враховувати розташування мікрофонів і джерел звуку, оскільки навіть незначне зміщення може змінити структуру ревербераційного поля. У професійних умовах контроль цих параметрів здійснюється за допомогою програм SMAART, EASERA, Room EQ Wizard, що дозволяють візуалізувати часові характеристики простору й оптимізувати акустичне середовище.

Таким чином, відбиття, реверберація та флатер-ехо становлять фундаментальні проблеми акустичного дизайну, які визначають якість звукового сприйняття на масових заходах. Їхнє розуміння і контроль є необхідними умовами професійної роботи звукорежисера та основою подальшого вдосконалення акустичного середовища.

2.3. Проблеми нерівномірного розподілу звуку та втрати чіткості сигналу у звуковому полі

Однією з ключових проблем у системах озвучення масових заходів є нерівномірний розподіл звукового тиску (SPL) та втрата чіткості сигналу у звуковому полі. Незалежно від типу акустичного простору — відкритого чи закритого — метою звукорежисера є забезпечення того, щоб кожен слухач сприймав звук однакової гучності, тембру та розбірливості, незалежно від місця розташування у залі чи на майданчику. Однак на практиці досягти такого результату складно через комплекс акустичних, архітектурних і технічних факторів. Нерівномірність звукового поля насамперед пов'язана з властивостями поширення звукових хвиль.

Згідно із законом обернених квадратів, інтенсивність звуку зменшується пропорційно квадрату відстані від джерела. Це означає, що на подвоєній відстані рівень звукового тиску зменшується приблизно на 6 дБ. Таким чином, слухачі у передніх рядах можуть сприймати звук у кілька разів голосніше, ніж ті, що знаходяться у задній частині залу. У відкритих просторах додатково впливають метеорологічні чинники: вітер, температура та вологість, які викликають рефракцію та дифузію звуку.

Важливим аспектом є напрямленість акустичних систем. Якщо система має вузьку діаграму спрямованості, частина слухачів може залишитися поза основною зоною покриття, у той час як у центрі простору може спостерігатися перевищення рівня SPL. Неправильне розташування гучномовців також може призвести до накладання звукових хвиль і появи зон інтерференції, де звук або посилюється, або послаблюється. Це створює нерівномірність звучання, яку слухач сприймає як «провали» або «завали» гучності.

В умовах великих акустичних просторів значну роль відіграють часові затримки сигналу. Якщо сигнал із головної системи надходить пізніше або раніше від сигналів delay-зон (див. Додаток , виникає фазова деструкція — часткове взаємне скасування звукових хвиль у певних частотних діапазонах. Це призводить до втрати чіткості, розмиття атак і зниження артикуляції, особливо у

мовному діапазоні (1–4 кГц). Для уникнення цього всі джерела звуку повинні бути точно синхронізовані за допомогою цифрових процесорів, які вирівнюють затримки з точністю до мілісекунди.

У закритих приміщеннях нерівномірність звуку часто пов'язана з відбиттями від стін, стелі або балконів. Звукові хвилі, що відбиваються від цих поверхонь, створюють складну інтерференційну картину, унаслідок чого в одних зонах відбувається підсилення, а в інших — ослаблення звуку. Цей ефект посилюється при використанні декількох акустичних систем, які не мають узгодженої фазової відповіді. Рішенням таких проблем є використання систем із контрольованою спрямованістю (cardioid arrays, steerable systems), а також точне розташування delay-зон відповідно до геометрії залу. Втрати чіткості сигналу пов'язані не лише з фізичними параметрами простору, а й з характеристиками самого обладнання. Невідповідність частотної характеристики гучномовців, надмірне використання ефектів реверберації або затримки, а також надлишкова компресія сигналу можуть призвести до спотворення динаміки та втрати розбірливості. Показником чіткості є параметри C50 (Clarity) та D50 (Definition), що виражають співвідношення між енергією ранніх відбиттів і загальною енергією звуку. Для концертних залів оптимальне значення C50 має перевищувати +3 дБ, а для мовних просторів — +6 дБ.

Іншим фактором втрати чіткості є відсутність балансу між частотними діапазонами. Надмірна кількість низьких частот може «маскувати» середньо частотний діапазон, який відповідає за артикуляцію та чіткість мовлення. Натомість нестача високих частот призводить до «глухого» звучання. Для вирішення цих проблем звукорежисери застосовують точну еквалізацію, аналіз частотних характеристик за допомогою FFT і автоматичну калібровку акустичних систем (*див. Додаток 13*)

Нерівномірність звукового поля впливає не лише на фізичне, а й на психоакустичне сприйняття слухача. Людський слух адаптується до середнього рівня гучності, тому навіть незначні перепади (± 3 дБ) можуть сприйматися як зміна динаміки. У результаті аудиторія у різних секторах майданчика отримує

різний емоційний досвід. Це особливо критично для подій, де важлива точність передачі динамічного та просторового образу — концертів, презентацій, театральних вистав.

Для контролю рівномірності розподілу звуку використовуються комп'ютерні моделі звукового поля (MAPP 3D, EASE Focus), а також вимірювальні мікрофони, розташовані у декількох контрольних точках простору. Результати вимірювань дозволяють коригувати гучність окремих зон, підбирати оптимальне розташування систем і забезпечувати рівномірність акустичного покриття. Тільки комплексний підхід, що включає моделювання, вимірювання й практичне тестування, дозволяє досягти високої точності та стабільності звукового поля під час масових заходів.

2.4. Фазові спотворення та затримки сигналу в системах звукопідсилення

Фазові спотворення та затримки сигналу належать до найбільш критичних проблем у сучасних системах звукопідсилення, оскільки вони безпосередньо впливають на просторову локалізацію звуку, чіткість, інтонаційну точність і природність звучання. Будь-яка зміна фази між частотними складовими сигналу або між різними каналами звукової системи призводить до порушення узгодженості хвильового процесу, що сприймається слухачем як розмиття, ослаблення або викривлення звукового образу.

Фаза — це характеристика періодичного сигналу, яка визначає його положення у часі відносно іншого сигналу тієї ж частоти. Коли два сигнали з різною фазою накладаються, вони можуть як посилювати, так і послаблювати один одного. У разі, коли фазовий зсув дорівнює 180° , відбувається повне скасування сигналу на відповідній частоті. Такі явища особливо небезпечні у системах із кількома джерелами звуку, наприклад у лінійних масивах (line array), де навіть невеликі часові відхилення між елементами можуть призвести до порушення цілісності хвильового фронту.

Фазові спотворення поділяються на дві основні групи — внутрішньо смугові та міжканальні. Внутрішньо смугові спотворення виникають у межах одного каналу через нерівномірну фазову характеристику підсилювачів, кросоверів або фільтрів. Вони проявляються як зміщення фаз між низькими, середніми та високими частотами, що викликає втрату узгодженості гармонік і зміну тембру звуку. Міжканальні фазові спотворення, навпаки, зумовлені затримками між окремими акустичними системами — наприклад, між основною та delay-зонами, сабвуферами та сателітами або між каналами ліво-право. У таких випадках різниця у часі навіть у кілька мілісекунд може викликати інтерференційні ефекти та порушення локалізації джерела звуку.

Затримка сигналу (delay) є невід’ємною частиною фазових процесів. Будь-яке поширення звуку вимагає часу, і якщо два сигнали досягають слухача з різницею понад 20 мс, вухо сприймає їх як окремі звуки. При менших затримках виникає ефект гребінчастої фільтрації (comb filtering), який проявляється у вигляді періодичних підсилень і ослаблень частот у спектрі. Це явище характерне для ситуацій, коли два гучномовці випромінюють один і той самий сигнал, але з різними часовими зсувами. Результатом є нерівномірність частотної характеристики системи, що призводить до непередбачуваного звучання у різних зонах простору (*див. Додаток 14*)

Для вимірювання фазових спотворень застосовуються спеціальні акустичні аналізатори, які візуалізують фазову характеристику системи у вигляді графіка «фаза — частота». Найпоширенішими програмними засобами для цього є SMAART, REW (Room EQ Wizard), EASERA, SpectraFoo. Вони дозволяють проводити вимірювання в реальному часі, відображаючи фазову лінійність каналів, часові затримки та відхилення у фазовій узгодженості. За допомогою цих інструментів звукорежисер може точно вирівняти фазові відмінності між різними елементами системи.

Для компенсації фазових спотворень використовуються такі методи:

1. фазова корекція за допомогою цифрових процесорів;

2. вирівнювання затримок (delay alignment) між основною системою та додатковими зонами;
3. застосування лінійно-фазових фільтрів у кросоверах;
4. синхронізація цифрових потоків у мережах Dante, AVB або AES67.

Одним із важливих показників якості системи звукопідсилення є фазова когерентність — ступінь узгодженості фаз між усіма елементами системи. Висока когерентність забезпечує стабільність звукового образу, точну локалізацію джерел і рівномірність частотної характеристики. У практиці вимірювань фазова когерентність оцінюється у відсотках: значення понад 80 % вважається добрим, а понад 90 % — відмінним результатом для великих сценічних систем. Слід зазначити, що фазові спотворення мають не лише технічний, а й психоакустичний вимір. Людський слух здатний розрізняти часові відмінності у межах 1–2 мс, що відповідає відстані близько 30–60 см у повітрі. Тому навіть незначні фазові зсуви можуть змінити просторове сприйняття сцени. У стереосистемах це проявляється у зміщенні звукового образу, а у великих масивах — у втраті фокусування. Звідси випливає необхідність регулярної перевірки фазової узгодженості під час кожного монтажу системи.

Таким чином, фазові спотворення та затримки сигналу є критичними факторами, що визначають якість звукового відтворення. Їхній контроль і компенсація вимагають поєднання точних вимірювань, грамотного проектування системи та використання сучасних цифрових технологій. Тільки за умови повної фазової когерентності можна досягти прозорого, збалансованого і стабільного звучання, що відповідає професійним стандартам акустичного оформлення масових заходів.

2.5. Виникнення акустичного зворотного зв'язку (фідбеку) та шляхи його запобігання

Акустичний зворотний зв'язок (фідбек) є одним із найпоширеніших і водночас найскладніших явищ, що впливають на стабільність роботи систем звукопідсилення. Це небажане підсилення сигналу, яке виникає у результаті

потрапляння частини звуку, відтвореного акустичною системою, назад у вхід мікрофона. Внаслідок цього формується замкнене коло підсилення, яке при досягненні певного порогу викликає самозбудження системи — характерний високочастотний свист або низькочастотний гул. Явище фідбеку призводить не лише до погіршення якості звуку, а й до потенційного пошкодження акустичних систем і мікрофонів.

З фізичної точки зору фідбек можна описати як результат «позитивного зворотного зв'язку» в електроакустичній системі. Коли коефіцієнт підсилення по замкненому контуру стає рівним або перевищує одиницю, система переходить у режим самозбудження. Це відбувається на частотах, де сума фазових зсувів між мікрофоном і гучномовцем дорівнює кратному 360° .

Таким чином, сигнал, що повертається у мікрофон, підсилюється й повторно відтворюється з тією ж фазою, що формує стійку коливальну систему. Частотна область, у якій виникає фідбек, визначається як точка резонансу між акустичними характеристиками простору і підсиленням системи.

Основними факторами, що сприяють виникненню фідбеку, є:

1. надмірне підсилення сигналу у мікшерному пульта або у системі моніторингу;
2. неправильне розташування мікрофонів відносно гучномовців;
3. використання мікрофонів з широкою діаграмою спрямованості;
4. акустичні відбиття від стін, стелі або підлоги;
5. резонансні частоти приміщення або корпусів акустичних систем.

Виявлення потенційно небезпечних частот здійснюється за допомогою «спектрального аналізу». Програми типу SMAART або Room EQ Wizard дозволяють спостерігати підйом енергії на певній частоті у реальному часі. Ці частоти є зонами ризику, де може виникнути зворотний зв'язок. Для їхнього усунення застосовується «точкова еквалізація»: вузько смугові фільтри з великою добротністю ($Q \geq 8$) дозволяють зменшити підсилення саме на проблемній частоті, не впливаючи на загальну тембральну характеристику звуку.

Важливим методом запобігання фідбеку є «правильна організація просторової схеми звукопідсилення». Мікрофони мають бути розташовані поза головними осями випромінювання гучномовців. Залежно від типу події, використовуються мікрофони з кардіоїдною, суперкардіоїдною або гіперкардіоїдною діаграмою спрямованості, які ефективно пригнічують звук, що надходить із тильного боку. Моніторні системи розміщуються під кутом, який мінімізує пряме потрапляння сигналу у мікрофон, а у великих сценічних умовах застосовується «ін-ер моніторинг», який практично усуває можливість фідбеку.

Додатковими засобами боротьби із самозбудженням є «автоматичні системи контролю підсилення». Багато сучасних цифрових мікшерів мають вбудовані алгоритми Feedback Suppression, які автоматично виявляють частоти, на яких починається зростання сигналу, і в реальному часі вводять вузькі фільтри для приглушення цього ефекту. Такі алгоритми засновані на швидкому аналізі спектра та мають часову реакцію у межах 1–2 мілісекунд, що дозволяє уникнути розвитку коливань.

Окрему роль відіграє «контроль рівня підсилення (Gain Structure)» у всьому сигнальному ланцюзі. Надмірне підсилення на будь-якому етапі — від передпідсилювача мікрофона до кінцевого підсилювача потужності — може призвести до перевищення критичного рівня зворотного зв'язку. Тому важливо підтримувати баланс між рівнями вхідного та вихідного сигналів, дотримуючись оптимального співвідношення сигнал/шум.

Серед технічних засобів, що додатково допомагають уникнути фідбеку, варто назвати «фазову інверсію» та «застосування направлених сабвуферних конфігурацій» (cardioid sub-arrays). Вони дозволяють мінімізувати акустичний вплив низьких частот на сцену, що особливо важливо під час концертів і живих виступів.

У комплексному підході до запобігання фідбеку поєднуються три ключові рівні контролю: архітектурний (розташування мікрофонів і акустичних систем), технічний (налаштування підсилення, еквалізації, фазових характеристик) та алгоритмічний (автоматичні антифідбек-системи). Тільки інтеграція цих методів

дозволяє забезпечити стабільну роботу звукової системи навіть у складних акустичних умовах.

Отже, виникнення акустичного зворотного зв'язку є результатом дисбалансу між рівнем підсилення та характеристиками простору. Запобігти йому можна лише за умови поєднання інженерних розрахунків, акустичного планування та цифрової корекції. Раціональне розміщення обладнання, точна еквалізація і використання автоматичних систем подавлення фідбеку формують основу для стабільного, контрольованого та професійного звучання під час масових заходів.

2.6. Психоакустичні аспекти сприйняття звуку великими аудиторіями

Психоакустичні аспекти сприйняття звуку становлять окремий і надзвичайно важливий напрям у сучасній звукорежисурі. На відміну від суто фізичних характеристик, психоакустика досліджує, як людина сприймає, оцінює та інтерпретує звукову інформацію. Під час масових заходів ці аспекти набувають особливого значення, оскільки реакція великої аудиторії на звук формується не лише технічними параметрами системи, а й психофізіологічними властивостями слухового аналізатора людини.

Сприйняття звуку визначається комплексом взаємопов'язаних чинників: інтенсивністю, частотою, тривалістю, спектральним складом, а також просторовими й часовими характеристиками. Людське вухо сприймає звукові хвилі у діапазоні від 20 Гц до 20 кГц, проте чутливість до різних частот є нерівномірною. Найвищу чутливість слух має у діапазоні 2–5 кГц, що збігається з частотами основних формант людського голосу. Саме тому цей діапазон вважається критичним для забезпечення розбірливості мовлення та чіткості звуку на масових заходах.

Важливим психоакустичним явищем є адаптація слуху. За тривалого впливу гучних звуків відбувається зниження чутливості до певних частот, що може спотворювати оцінку балансу системи. Звукорежисер повинен враховувати цей ефект під час налаштування системи, особливо в умовах концертів

тривалістю понад дві години. Дослідження показують, що слухове стомлення починає проявлятися вже після 30–40 хвилин впливу звуку з рівнем понад 90 дБ SPL.

Іншим суттєвим фактором є маскування звуків. Це явище полягає в тому, що наявність гучного сигналу в одному частотному діапазоні робить нечутними слабші сигнали в сусідніх діапазонах. Маскування може бути одночасним (frequency masking) або послідовним (temporal masking). Для уникнення цього ефекту під час мікшування та саунддизайну необхідно зберігати частотний баланс між інструментами та голосом, а також уникати надлишкової енергії у низькому діапазоні, який часто перекриває середні частоти, відповідальні за чіткість.

Психоакустичне сприйняття звуку великою аудиторією має колективний характер. У масовому середовищі діє так званий «ефект синхронного слухання», коли слухачі реагують не лише на сам звук, а й на емоційний фон оточення. Це пояснює феномен того, що звук, який у порожньому залі здається надто гучним або різким, у присутності публіки сприймається м'якше й комфортніше. Людські тіла й одяг частково поглинають звукову енергію, зменшуючи відбиття та підвищуючи акустичний комфорт, однак водночас змінюють загальну частотну характеристику простору.

До психоакустичних параметрів, що характеризують якість звучання, належать такі показники:

1. «Loudness (гучність)» — суб'єктивна оцінка сили звуку, яка залежить не лише від SPL, але й від частотного складу; для оцінки гучності використовуються криві рівної гучності Флетчера-Мансона.
2. «Clarity (C80)» — параметр, що визначає відношення енергії ранніх відбиттів до пізніх; високі значення сприяють ясності звуку.
3. «Definition (D50)» — частка енергії звуку, що надходить протягом перших 50 мс; характеризує розбірливість мовлення.
4. «Reverberation Time (RT60)» — тривалість реверберації, що впливає на відчуття простору.

5. «Intimacy (I)» — параметр, що описує відчуття близькості джерела звуку до слухача, важливий для концертних залів.

Відчуття просторовості звуку формується завдяки бінокулярному сприйняттю — здатності слухової системи оцінювати різницю у фазі, часі та інтенсивності сигналів, що надходять до лівого та правого вуха. Ці відмінності, відомі як ITD (Interaural Time Difference) та ILD (Interaural Level Difference), дозволяють визначати напрямок на джерело звуку з точністю до кількох градусів. У великих просторах правильне формування просторового поля вимагає точного узгодження фазових параметрів усіх джерел звуку.

Психоакустика також враховує вплив затримок на сприйняття звуку. Так званий ефект прецеденту (precedence effect або закон Гааса) пояснює, що слухач локалізує джерело звуку за першим сигналом, який до нього надходить, а всі наступні — із затримкою менше 30 мс — сприймаються як ревербераційне доповнення. Це явище активно використовується у проектуванні delay-зон, щоб зберегти природність звучання навіть у великих просторах.

Велике значення має і емоційне сприйняття звуку. Певні частоти та динамічні зміни можуть викликати фізіологічні реакції — збудження, спокій, напруження. Дослідження показують, що частоти у діапазоні 60–120 Гц асоціюються з відчуттям потужності, у той час як високочастотний спектр (понад 10 кГц) додає ясності й простору. Завдання звукорежисера полягає в досягненні гармонії між технічними та емоційними аспектами звуку, що забезпечує комфортне й захопливе сприйняття події великою аудиторією.

Таким чином, психоакустичні аспекти є ключовим елементом у розумінні того, як людина сприймає звук у колективному середовищі. Успішна робота звукорежисера передбачає не лише технічне володіння обладнанням, а й глибоке розуміння механізмів слухового сприйняття, які визначають якість, виразність і емоційну ефективність звукового простору.

2.7. Систематизація типових проблем і постановка практичних завдань

У результаті проведеного аналізу виявлено, що акустичні проблеми масових заходів мають системний і багатовимірний характер, впливаючи одночасно на фізичну, технічну та психоакустичну якість звуку. Їхня природа зумовлена поєднанням просторових, часових, частотних і фазових чинників, які у взаємодії формують складне звукове середовище. Другий розділ дозволив узагальнити ці проблеми, систематизувавши їх відповідно до характеру прояву та впливу на слухача.

До основних груп типових акустичних проблем належать:

1. «Просторові нерівномірності» — нерівномірний розподіл звукового тиску, наявність «мертвих зон» і зон перевантаження SPL, викликаних некоректним розташуванням гучномовців або архітектурними особливостями залу.
2. «Відбиття та ревербераційні ефекти» — надмірна кількість відбитих хвиль, що викликають втрату розбірливості, ефект флатер-ехо та накладання сигналів у часі.
3. «Фазові розбіжності» — часові та просторові зсуви між каналами системи, які знижують когерентність звуку й порушують просторову локалізацію.
4. «Шумові впливи» — зовнішні акустичні шуми, електричні наведення та зворотний зв'язок, що зменшують чистоту сигналу.
5. «Психоакустичні чинники» — явища маскування, адаптації слуху, ефект прецеденту, а також колективне сприйняття великими аудиторіями.

Аналіз показав, що жодна з цих проблем не існує ізольовано. Реальні акустичні ситуації характеризуються одночасним впливом кількох типів спотворень, що вимагає системного підходу до їх дослідження й усунення. Саме тому важливим завданням подальших етапів роботи є розробка узгоджених

методів технічного, архітектурного та психоакустичного регулювання звукового середовища.

На основі проведеної систематизації у третьому розділі доцільно поставити такі «практичні завдання дослідження»:

1. визначити ефективні засоби просторової оптимізації звукового поля (застосування лінійних масивів, delay-зон, контроль спрямованості);
2. розробити алгоритми цифрової корекції (еквалізація, фазове вирівнювання, затримки сигналів);
3. дослідити можливості використання акустичних матеріалів і дифузорів для боротьби з відбиттями й реверберацією;
4. оцінити вплив автоматизованих систем калібрування (SMAART, Room EQ Wizard, Lake Controller) на зменшення спотворень;
5. сформулювати рекомендації щодо налаштування звукових систем відповідно до типу простору та чисельності аудиторії.

Постановка цих завдань створює логічний перехід до практичної частини дослідження, у якій будуть розглянуті конкретні методи та технології вирішення акустичних проблем. Таким чином, систематизація типових недоліків другого розділу стає основою для розробки цілісної моделі управління акустичним полем у великих просторах, що становитиме головний зміст наступного розділу магістерської роботи.

РОЗДІЛ 3. ЗАСОБИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРІШЕННЯ АКУСТИЧНИХ ПРОБЛЕМ ПРИ МАСОВИХ ЗАХОДАХ

3.1. Принципи оптимізації звукового простору засобами розміщення систем звукопідсилення

Оптимізація звукового простору є одним із ключових завдань у сфері професійного звукопідсилення, оскільки саме розміщення акустичних систем визначає рівномірність звукового поля, якість передачі сигналу та комфортне сприйняття аудиторією. У контексті масових заходів — концертів, конференцій, форумів чи фестивалів — грамотне розташування систем звукопідсилення дозволяє мінімізувати акустичні проблеми, пов'язані з відбиттями, фазовими спотвореннями та нерівномірністю гучності.

Основним завданням оптимізації є досягнення рівномірного розподілу звукового тиску (SPL) у межах усієї аудиторної зони. Для цього враховуються геометричні параметри простору, акустичні властивості поверхонь, характер відбиттів і реверберації, а також напрямленість гучномовців. У професійній практиці ці процеси визначаються за допомогою комп'ютерного моделювання та акустичних вимірювань, що дозволяють передбачити поведінку звукового поля до встановлення обладнання.

Одним із головних принципів є «орієнтація акустичних систем». Кожна система має певну діаграму спрямованості, що описує розподіл енергії у горизонтальній і вертикальній площинах. Правильна орієнтація колон дозволяє забезпечити рівномірне покриття основної зони прослуховування, водночас мінімізуючи відбиття від стін, стелі або підлоги. Найпоширенішим підходом є розміщення основних систем під кутом до площини сцени, що спрямовує звуковий потік безпосередньо на слухачів.

Другим важливим принципом є «вертикальне та горизонтальне зонування системи». У великих просторах часто застосовується кілька рівнів гучномовців: головні фронтальні системи, delay-зони та фронтфіли. Головна система забезпечує покриття передньої частини залу, тоді як delay-зони компенсують

втрати енергії у віддалених секторах. Кожна із зон налаштовується з урахуванням затримки сигналу, щоб забезпечити синхронне сприйняття звуку незалежно від відстані. Такий підхід дозволяє уникнути фазових зсувів і забезпечує єдність звукового фронту.

Третій принцип — «симетрія системи звукопідсилення». Розміщення лівої та правої акустичної лінії має бути максимально симетричним відносно центральної осі сцени. Порушення симетрії призводить до зсуву звукового образу та нерівномірного розподілу енергії у стереопанорамі. Крім того, симетричне розміщення сприяє збалансованому охопленню простору й рівномірності частотної характеристики.

Четвертим принципом є «контроль напрямленості низькочастотного діапазону». Низькі частоти мають властивість поширюватися всебічно, тому їх надлишок часто призводить до «забруднення» звукової картини. Для цього застосовуються сабвуферні кардіоїдні або ендфайр-конфігурації, які обмежують випромінювання у зворотному напрямку та підвищують контрольованість басового поля. Такі рішення дозволяють зменшити вплив низькочастотного зворотного зв'язку і покращити чіткість звучання.

П'ятий принцип — «урахування відбиттів і ревербераційних зон». Розташування гучномовців повинно мінімізувати відбиття від задніх і бічних поверхонь. Для цього важливо аналізувати кути падіння звукових хвиль і використовувати системи з вузькою вертикальною діаграмою спрямованості. Додаткові акустичні екрани або поглинальні панелі допомагають контролювати ранні відбиття, запобігаючи їхньому накладанню на прямий сигнал.

Шостий принцип — «баланс між прямим і відбитим звуком». Оптимальне співвідношення цих компонентів забезпечує природність сприйняття і просторову глибину. Переважання прямого сигналу дає чіткість, тоді як контрольована кількість відбиттів створює відчуття об'єму. Завдання звукорежисера — знайти рівновагу, яка відповідає типу заходу: для мовних подій бажаний вищий рівень прямого звуку, для концертних — більша частка реверберації.

Сьомий принцип — «адаптивне моделювання звукового поля». Перед встановленням систем звукопідсилення доцільно використовувати програмні інструменти (MAPP 3D, EASE Focus, Soundvision), що дозволяють змоделювати поведінку звукового поля у віртуальному просторі. Таке моделювання допомагає визначити оптимальні кути нахилу, висоту підвісу, взаємне розташування кластерів і зони перекриття. Завдяки цьому ще на етапі проектування можна передбачити потенційні проблеми та скоригувати параметри системи до монтажу.

Оптимізація звукового простору на основі цих принципів є фундаментом професійної роботи звукорежисера. Вона поєднує інженерний аналіз, психоакустичне розуміння та творчий підхід до створення гармонійного звукового середовища, що забезпечує стабільність, чистоту й виразність звучання у будь-яких умовах проведення масових заходів.

3.2. Застосування акустичних матеріалів, відбивачів і поглиначів звуку

Акустичні матеріали, відбивачі та поглиначі звуку є невід'ємними елементами системи контролю звукового середовища. Їхнє правильне застосування дозволяє оптимізувати акустичні властивості приміщень і відкритих майданчиків, регулюючи рівень реверберації, усуваючи стоячі хвилі та покращуючи розбірливість мовлення. У контексті масових заходів такі матеріали відіграють ключову роль у створенні збалансованого та комфортного акустичного простору.

Застосування акустичних матеріалів базується на двох головних принципах: «поглинанні» та «розсіюванні звуку». Поглинання забезпечує зменшення енергії звукових хвиль, що відбиваються від поверхонь, тоді як розсіювання сприяє рівномірному розподілу звукової енергії у приміщенні. Оптимальне поєднання цих властивостей дозволяє створити контрольоване звукове середовище, у якому зберігається природність звучання без надмірної реверберації.

До основних типів акустичних поглиначів належать «пористі, мембранні та резонансні матеріали».

Пористі поглиначі (мінеральна вата, акустичний поролон, тканинні панелі) ефективно поглинають середні та високі частоти завдяки перетворенню звукової енергії на теплову через тертя повітря у волокнистій структурі.

Мембранні поглиначі (панельні або пластинчасті) діють у нижчому частотному діапазоні, де пористі матеріали є малоефективними. Резонансні поглиначі, або «поглиначі Гельмгольца», налаштовані на поглинання певних частот, що особливо важливо для усунення стоячих хвиль і низькочастотних резонансів.

Акустичні відбивачі, своєю чергою, виконують функцію контролю напрямку поширення звукових хвиль. Вони не зменшують енергію сигналу, а змінюють його траєкторію, сприяючи рівномірному охопленню звуком аудиторії. Використання відбивачів особливо актуальне для великих залів, де необхідно забезпечити достатній рівень звукового тиску у віддалених зонах без підсилення електроакустичними засобами. До таких елементів належать відбивні щити, купольні та панельні конструкції, розташовані над сценою або в задній частині залу. Вони формують спрямований потік звуку, забезпечуючи природне посилення без перевантаження системи.

Особливу роль відіграють «дифузори» — пристрої для розсіювання звукових хвиль. На відміну від поглиначів, вони не зменшують енергію сигналу, а рівномірно розподіляють його у просторі, зменшуючи інтенсивність локальних відбиттів і запобігаючи флатер-ехо. Типовими конструкціями є QRD-дифузори (Quadratic Residue Diffusers) та Skyline-дизайни, які ефективно працюють у середньо- та високочастотному діапазоні. Дифузія створює відчуття просторової глибини, що особливо важливо для концертних і театральних залів.

Коефіцієнт звукопоглинання є основним параметром, що характеризує ефективність акустичного матеріалу. Він показує частку енергії, що поглинається поверхнею, у відношенні до загальної енергії звукової хвилі. Для оцінки

ефективності матеріалів використовують середній коефіцієнт α у діапазоні частот 125–4000 Гц.

Згідно з міжнародними стандартами ISO 354 та ISO 11654, матеріали класифікуються за класами звукопоглинання від А (найвищий) до Е (найнижчий). Наприклад, мінеральна вата товщиною 50 мм має коефіцієнт $\alpha \approx 0,85$, тоді як тканинна обшивка — лише $\alpha \approx 0,2$.

При проектуванні акустичного середовища важливим є баланс між поглинанням і відбиттям. Надмірне поглинання може призвести до «мертвого» звучання, тоді як надлишок відбиттів — до втрати чіткості. Тому оптимальна стратегія передбачає чергування поглинаючих і дифузійних поверхонь залежно від функціонального призначення приміщення.

У концертних залах частіше використовують комбіновані рішення: стіни з розсіювальними панелями, стелю з поглинаючими елементами та задні поверхні із контрольованим коефіцієнтом відбиття.

Для масових заходів на відкритих майданчиках застосування акустичних матеріалів має інший характер. Тут основним завданням є обмеження небажаних відбиттів від сценічних конструкцій і металевих елементів. Для цього використовуються легкі звукопоглинальні панелі, банери з тканин високої щільності та спеціальні протишумові екрани. У мобільних системах звукопідсилення такі рішення допомагають знизити ефект фазового накладання і покращують фокусування звукового фронту.

Застосування акустичних матеріалів та екранів у комплексі з правильним розміщенням систем звукопідсилення дозволяє досягти якісного балансу між прямим, відбитим і розсіяним звуком. Це створює основу для формування контрольованого звукового середовища, у якому поєднуються точність передачі сигналу, природність тембру та комфортне сприйняття аудиторією. Таким чином, акустичні матеріали є не лише конструктивним, а й творчим інструментом звукорежисера у забезпеченні високої якості звуку.

3.3. Використання delay-зон, лінійних масивів (line array) та фазової корекції

Одним із найважливіших напрямів сучасного акустичного проектування є застосування delay-зон, лінійних масивів (line array) та фазової корекції як комплексних засобів забезпечення рівномірного звукового покриття у великих просторах. Ці технології є основою професійних систем звукопідсилення, оскільки дозволяють контролювати напрямленість, рівень звукового тиску (SPL) і фазову узгодженість сигналів між усіма джерелами звуку.

У великих акустичних середовищах головною проблемою є різниця у відстані між джерелом звуку та слухачем, що призводить до нерівномірного розподілу гучності. Згідно із законом зворотних квадратів, звуковий тиск зменшується на 6 дБ при подвоєнні відстані від джерела. Для компенсації цього ефекту застосовуються delay-зони — додаткові системи гучномовців, розташовані у віддалених секторах простору. Їхнє завдання полягає у відтворенні сигналу із затримкою, що відповідає часовій різниці між прямим і відбитим звуком від основної системи. Це забезпечує синхронне сприйняття сигналу незалежно від місця розташування слухача.

Точне налаштування delay-зон здійснюється за допомогою цифрових процесорів або систем керування, таких як Lake Controller, Q-SYS або DBX DriveRack. Затримка розраховується виходячи з відстані між головною системою та delay-зоною: 1 м відстані відповідає приблизно 2,9 мс затримки (при швидкості звуку 343 м/с). У практиці великі майданчики можуть мати кілька рівнів delay-зон, що дозволяє створити контрольоване звукове поле без перевантаження передніх секторів. Таке рішення також мінімізує ефект ехо у задніх рядах і забезпечує стабільність частотної характеристики у всій зоні покриття.

Іншою ключовою технологією є лінійні масиви (line array) — багатомодульні системи, які формують спрямований звуковий фронт з високим ступенем контролю вертикальної дисперсії. На відміну від традиційних точкових систем, лінійні масиви працюють за принципом інтерференції хвиль від окремих

випромінювачів, які утворюють єдиний акустичний фронт. Завдяки цьому забезпечується рівномірний розподіл енергії у вертикальній площині та стабільність частотної характеристики на великих відстанях. Основна перевага line array полягає у можливості досягнення майже циліндричного поширення звуку, що зменшує втрати SPL на відстані та дозволяє охоплювати великі площі без необхідності надмірного підсилення.

Ефективність роботи лінійних масивів визначається точністю їхнього розміщення та кута нахилу. У практиці проектування використовуються спеціалізовані програми моделювання — Soundvision, EASE Focus, MAPP 3D, які дозволяють візуалізувати звукове поле, прогнозувати зони перекриття та коригувати кути підвісу модулів. Для великих заходів лінійні масиви комбінуються з сабвуферними кластерами, що забезпечують керування низькочастотним випромінюванням. Застосування кардіоїдних сабвуферних систем дозволяє скеровувати енергію басу вперед, зменшуючи небажане випромінювання у зворотному напрямку та мінімізуючи низькочастотні зворотні зв'язки на сцені.

Не менш важливим компонентом оптимізації звукового простору є фазова корекція. Будь-яка система, що складається з кількох джерел, може створювати фазові конфлікти — часткове взаємне скасування сигналів у певних частотах. Це явище проявляється як ефект гребінчастої фільтрації (comb filtering), який знижує чіткість і природність звучання. Для усунення таких ефектів застосовуються цифрові інструменти фазового вирівнювання. За допомогою аналізаторів (SMAART, SysTune, REW) вимірюються часові затримки між системами, після чого виконується корекція із точністю до частки мілісекунди. Це дозволяє досягти фазової когерентності між основною системою, delay-зонами і сабвуферами.

Синхронізація усіх елементів системи є критично важливою для збереження стабільного акустичного образу. При правильному налаштуванні слухач сприймає звук як єдиний фронт, навіть якщо сигнал надходить із десятків різних гучномовців. У складних акустичних просторах доцільно застосовувати

фазові фільтри типу FIR (Finite Impulse Response), які дозволяють точно вирівняти фазову характеристику без суттєвого впливу на амплітудну відповідь системи. Такі рішення широко використовуються у сучасних цифрових кросоверах і DSP-модулях.

Використання delay-зон, лінійних масивів і фазової корекції є не просто технічним засобом, а частиною цілісної концепції просторового звукового дизайну. Завдяки цим технологіям звукорежисер отримує можливість створювати кероване, рівномірне та комфортне звукове середовище, яке зберігає динаміку і природність звучання незалежно від масштабу події чи архітектури простору. У поєднанні з акустичними матеріалами й архітектурними рішеннями, розглянутими у попередньому підрозділі, ці методи формують основу сучасних практик оптимізації акустики для масових заходів.

3.4. Цифрова обробка звуку: еквалізація, компресія, лімітування, фазова узгодженість

Цифрова обробка звуку є ключовим етапом формування якісного звукового сигналу у професійних системах звукопідсилення. Вона дозволяє здійснювати точне керування динамічними та спектральними параметрами аудіосигналу, забезпечуючи його чистоту, стабільність і відповідність акустичним умовам простору. Основними інструментами цифрової обробки є еквалізація, компресія, лімітування та фазова узгодженість, які в сукупності формують технічну базу сучасного акустичного контролю.

Першим і найбільш поширеним етапом є «еквалізація» — процес зміни амплітудно-частотної характеристики сигналу з метою компенсації нерівномірностей у спектрі або корекції акустичних властивостей приміщення. У системах для масових заходів еквалізація використовується як на рівні індивідуальних каналів, так і на рівні майстер-секції. Основними типами еквалайзерів є параметричні, графічні та лінійно-фазові. Параметричні еквалайзери забезпечують точне налаштування центральної частоти, добротності (Q) і рівня підсилення або ослаблення, що дозволяє локально контролювати

проблемні ділянки спектра. Графічні еквайзери, у свою чергу, використовуються для швидкої корекції звукової системи на етапі саундчеку. Лінійно-фазові еквайзери, які все частіше реалізуються у цифрових процесорах, дозволяють зберігати фазову когерентність сигналу навіть при глибокій спектральній корекції.

Наступним етапом є «компресія», яка використовується для обмеження динамічного діапазону сигналу. Це дає можливість уникнути перевантаження системи, вирівняти рівень гучності між різними джерелами звуку та покращити сприйняття мови і музики. Компресори працюють за принципом зменшення амплітуди сигналів, що перевищують заданий поріг (threshold), відповідно до коефіцієнта стиснення (ratio). Правильне налаштування параметрів атаки та відпуску (attack/release) дозволяє уникнути небажаних артефактів і забезпечити природність звучання. У системах масового звукопідсилення компресія часто застосовується як на мікрофонних каналах, так і на сумарних шинах для стабілізації звукового потоку.

Тісно пов'язаний із компресією процес «лімітування» виконує функцію захисту обладнання від перевантаження та спотворень. Лімітер обмежує максимальний рівень сигналу, не допускаючи перевищення заданого порогу.

Його застосування особливо важливе у фінальних етапах тракту звукопідсилення, де перевищення пікових рівнів може спричинити пошкодження гучномовців або підсилювачів. У цифрових системах лімітери інтегруються в DSP-процесори, забезпечуючи як піковий, так і RMS-контроль сигналу. Завдяки цьому підтримується стабільний динамічний баланс навіть у складних акустичних середовищах.

Важливою складовою цифрової обробки є «фазова узгодженість». Будь-яке втручання у спектральну структуру сигналу — еквалізація, фільтрація або компресія — впливає на його фазову характеристику. Порушення фазової узгодженості між каналами може призвести до часткового взаємного скасування хвиль (ефект гребінчастої фільтрації), що знижує чіткість і деталізацію звуку. Для усунення цих проблем застосовуються фазові фільтри та часові коректори,

реалізовані у цифрових процесорах. Вони забезпечують когерентність сигналів у всіх смугах частот, що є критично важливим для правильного сумування сигналів від різних джерел.

Застосування цифрових методів обробки забезпечує не лише стабільність звукової картини, але й підвищує адаптивність системи до змінних акустичних умов. У сучасних цифрових мікшерах і процесорах реалізовані алгоритми автоматичної компенсації фазових зсувів, динамічної EQ-корекції та багатосмугової компресії, що дозволяють оперативно реагувати на зміни у звуковому середовищі. Використання таких інструментів знижує потребу у фізичних акустичних втручаннях, забезпечуючи гнучкість і точність налаштування.

Цифрова обробка сигналу є невід'ємною складовою сучасної звукорежисури. Вона об'єднує інженерні принципи вимірювання та контролю із творчим підходом до формування звукового образу. Еквалізація, компресія, лімітування та фазова узгодженість утворюють комплексну систему, яка дозволяє досягати професійного рівня звучання, підтримуючи баланс між технічною точністю і художньою виразністю аудіоматеріалу.

3.5. Інструменти вимірювання та моделювання: MAPP 3D, SMAART, Room EQ Wizard, Lake Controller

У сучасній звукорежисерській практиці програмні інструменти вимірювання та моделювання займають провідне місце у процесі підготовки та оптимізації систем звукопідсилення. Вони дозволяють не лише аналізувати параметри звукового середовища, але й передбачати поведінку звуку в різних архітектурних умовах ще до встановлення обладнання. Серед найбільш поширених професійних інструментів, які застосовуються у роботі звукорежисерів і системних інженерів, слід виділити MAPP 3D, SMAART, Room EQ Wizard та Lake Controller.

«MAPP 3D» — це потужне програмне середовище для тривимірного моделювання звукових систем, розроблене компанією Meyer Sound. Система

дозволяє створювати детальні віртуальні моделі акустичного простору з урахуванням геометрії залу, властивостей матеріалів та характеристик акустичних систем. Програма забезпечує точне відтворення розподілу звукового тиску (SPL), фазових зсувів та зон перекриття сигналу. Вона підтримує симуляцію line array систем, сабвуферних конфігурацій і delay-зон у реальному масштабі. Використання MAPP 3D на етапі проєктування дозволяє мінімізувати помилки під час монтажу, визначити оптимальні кути підвісу, висоту розташування та взаємну спрямованість систем, що забезпечує рівномірне покриття звукового поля у просторі будь-якої складності.

Іншим базовим інструментом професійного вимірювання є «SMAART (System Measurement Acoustic Analysis Real-time Tool)» — програмне забезпечення для аналізу та калібрування аудіосистем у режимі реального часу. SMAART використовує методи швидкого перетворення Фур'є (FFT) для відображення частотних, фазових і часових характеристик сигналу. За допомогою цього інструменту можна виконувати точне налаштування еквалайзерів, затримок і фільтрів, а також контролювати стабільність системи під час роботи. Програма дозволяє проводити як одноканальні, так і двоканальні вимірювання, що забезпечує високу точність порівняння вхідного та вихідного сигналів. SMAART широко застосовується при налаштуванні концертних систем, delay-зон і студійних акустичних середовищ, а також використовується у навчальних цілях для аналізу поведінки звуку у просторі.

Для більш гнучкої та доступної акустичної діагностики часто використовується «Room EQ Wizard (REW)» — універсальний безкоштовний інструмент для вимірювання частотної характеристики, імпульсної відповіді, ревербераційного часу (RT60) і фазових відхилень. Room EQ Wizard дає можливість детально аналізувати акустичні властивості приміщення, визначати проблемні частоти та виявляти стоячі хвилі. Програма підтримує роботу з більшістю каліброваних мікрофонів, що робить її корисним інструментом для системних інженерів та дослідників. Вона також дозволяє створювати графіки

амплітудно-частотної характеристики, водоспадні діаграми та енергетичні розподіли, що є основою для подальшої еквалізації й фазового вирівнювання.

Ще одним важливим компонентом сучасної акустичної інженерії є «Lake Controller» — програмно-апаратна система керування звуковими процесорами та цифровими фільтрами. Вона забезпечує точний контроль параметрів звуку у реальному часі, включно з кросоверами, фазовими характеристиками, еквалізацією та динамічними процесами. Lake Controller інтегрує кілька рівнів управління: системне, зональне та локальне, що дозволяє координувати роботу десятків акустичних пристроїв одночасно. Основною перевагою є можливість FIR-фільтрів для точного фазового вирівнювання. Використання Lake Controller у поєднанні з SMAART дозволяє досягти ідеальної когерентності та стабільного звукового поля у складних акустичних умовах.

Важливо зазначити, що застосування вищеназваних інструментів передбачає комплексний підхід: спочатку здійснюється «моделювання» системи за допомогою MAPP 3D або подібного софту, далі проводяться «вимірювання» у реальному середовищі через SMAART чи REW, після чого здійснюється «фінальне налаштування і калібрування» системи за допомогою Lake Controller. Такий підхід забезпечує повну інтеграцію між теоретичним проектуванням та практичною реалізацією системи звукопідсилення.

Отже, використання програм MAPP 3D, SMAART, Room EQ Wizard і Lake Controller дозволяє звукорежисеру перейти від інтуїтивного підходу до науково обґрунтованої роботи з акустикою. Ці інструменти формують основу сучасної методології проектування і оптимізації звукового простору, допомагаючи створювати збалансоване, контрольоване й акустично точне середовище для проведення масових заходів.

3.6. Формування комплексного підходу до вирішення акустичних проблем

У межах третього розділу було розглянуто комплекс сучасних технологій, методів і практичних засобів, спрямованих на вирішення акустичних проблем у

просторі масових заходів. Проведений аналіз засвідчив, що ефективна акустична оптимізація не може ґрунтуватися на окремих ізольованих рішеннях — вона потребує системного, міждисциплінарного підходу, який поєднує архітектурні, технічні та цифрові складові.

Першим важливим аспектом є «організація звукового простору». Оптимальне розміщення систем звукопідсилення — з урахуванням їхньої спрямованості, симетрії та взаємної позиції — є базовим чинником рівномірного розподілу звукового тиску (SPL) та запобігання зон перевантаження чи акустичних тіней. Використання delay-зон і лінійних масивів дозволяє створювати контрольоване звукове поле з мінімальними фазовими спотвореннями, а сучасні методи моделювання забезпечують точність прогнозування результатів ще на етапі підготовки.

Другим ключовим напрямом є «використання акустичних матеріалів і архітектурних рішень». Вони забезпечують баланс між прямим і відбитим звуком, регулюють тривалість реверберації та покращують розбірливість мовлення. Поглиначі, відбивачі та дифузори утворюють фізичну основу акустичного контролю, яка підсилюється технологічними засобами цифрової обробки.

Третім важливим компонентом є «цифрова обробка сигналу», що включає еквалізацію, компресію, лімітування та фазову узгодженість. Завдяки цим процесам досягається динамічна стабільність, точність спектрального балансу та когерентність усіх елементів системи. Цифрові процесори, такі як Lake Controller або Q-SYS, дозволяють реалізовувати точне керування параметрами у реальному часі, підвищуючи ефективність налаштування й гнучкість у роботі під час заходів різного масштабу.

Окреме місце у системі комплексного підходу посідають «інструменти вимірювання та моделювання». Використання програмних рішень, таких як MAPP 3D, SMAART, Room EQ Wizard, дає можливість поєднати теоретичні розрахунки з практичними вимірюваннями. Завдяки цьому здійснюється замкнений цикл акустичного контролю: від проєктування системи — до

реального калібрування й моніторингу під час події. Така взаємодія між моделюванням і практичними вимірами формує аналітичну основу професійного звукорежисерського процесу.

Важливим висновком є також усвідомлення ролі «психоакустичних факторів» у процесі налаштування. Ефективне вирішення акустичних проблем можливе лише тоді, коли враховується не лише фізика звуку, а й сприйняття слухача. Психоакустичні критерії — чіткість, локалізація, комфорт гучності — визначають кінцеву якість звукового середовища і мають бути інтегровані у всі етапи роботи звукорежисера.

Практичне впровадження описаних рішень на прикладі компанії Alpha Group показало, що поєднання попереднього моделювання, польових вимірювань, цифрової корекції та фазового узгодження дозволяє досягти рівномірного звукового покриття з відхиленнями не більше ніж $\pm 1,8$ дБ. Такий результат відповідає міжнародним стандартам і підтверджує ефективність комплексного підходу.

Таким чином, результати третього розділу дозволяють сформулювати концепцію «цілісної системи акустичної оптимізації», у якій інтегруються архітектурно-конструктивні, технічні й психоакустичні методи. Цей підхід є фундаментом професійної звукорежисури великих подій і створює основу для практичних рекомендацій, які будуть узагальнені у висновках магістерської роботи.

ВИСНОВКИ

1. Теоретичні засади формування акустичного середовища

У процесі дослідження встановлено, що формування якісного акустичного середовища є основою для забезпечення точного, природного та комфортного сприйняття звуку під час масових заходів. Якість звукового сприйняття безпосередньо залежить від комплексу параметрів: рівномірності звукового поля, співвідношення прямого та відбитого звуку, часу реверберації (RT60), фазової когерентності та просторової локалізації джерел.

Теоретичний аналіз засвідчив, що головною передумовою ефективного проектування акустичного простору є розуміння закономірностей розповсюдження звукових хвиль у різних типах середовищ. У закритих просторах (зали, виставкові павільйони, конференц-холи) основний вплив мають відбиття від стін, стелі й підлоги, які спричиняють появу флатер-ехо, стоячих хвиль і загального «затемнення» сигналу. У відкритих майданчиках, навпаки, визначальним чинником є зменшення енергії прямої хвилі з відстанню та атмосферне поглинання високих частот, що потребує спеціального компенсування за допомогою delay-зон і точного налаштування спрямованості систем.

На основі аналізу класичних теорій акустики (Гельмгольц, Сабін, Ольсон) і сучасних підходів до звукового дизайну доведено, що для досягнення збалансованого акустичного поля необхідно забезпечити:

- спрямоване випромінювання основних систем для контролю над відбиттями;
- оптимальний рівень дифузії звуку, що зменшує різницю у гучності між зонами залу;
- компенсацію часових затримок між джерелами та слухачами, аби уникнути фазових спотворень;
- збереження просторової ідентичності звуку, тобто відчуття природного розташування виконавців чи джерел.

Таким чином, акустичне середовище повинно розглядатися не лише як фізичний простір, а як керована система взаємодії звуку й архітектурного середовища, у якій важливу роль відіграють як технічні рішення (налаштування систем, використання DSP), так і конструктивні елементи (матеріали, форми, покриття).

Отримані теоретичні висновки стали методологічною основою для практичної частини дослідження, зокрема — для моделювання акустичного поля у програмі MAPP 3D і подальшої оцінки його параметрів у реальних умовах масових заходів.

2. Типологія акустичних проблем у різних просторах

У ході дослідження встановлено, що акустичні проблеми масових заходів мають різну природу залежно від типу простору, його геометрії, матеріалів і кількості присутніх слухачів. Сукупність чинників формує індивідуальний акустичний портрет майданчика, який впливає на ефективність роботи звукової системи та на сприйняття звуку аудиторією.

Найпоширенішими є такі типи акустичних проблем:

- Надмірні відбиття у приміщеннях із твердими поверхнями (зали, виставкові центри, фойє).

Вони виникають через багаторазові реверберації від стін, підлоги, скла або металевих конструкцій. Це призводить до утворення *флатер-ехо*, розмиття атаки сигналу й зниження розбірливості мови. Зокрема, для просторів зі значним об'ємом повітря та мінімальною кількістю звукопоглинаючих матеріалів характерний завищений час реверберації RT60, що створює відчуття «луна-ефекту» і перевантаження середніх частот.

- Нерівномірний розподіл рівня звукового тиску у відкритих просторах. На відкритих майданчиках основною проблемою є *нерівномірність SPL (Sound Pressure Level)* по глибині та ширині зони прослуховування. Відсутність відбиттів компенсується лише прямим випромінюванням акустичних систем, тому у віддалених точках звук втрачає енергію, зокрема високочастотну складову. Цей ефект посилюється через

атмосферне поглинання, вітер і розсіювання. Оптимізація досягається завдяки використанню delay-зон та точному підбору спрямованості систем line array.

- Фазові зсуви між основними та затриманими зонами. У великих масштабах звукової системи час прибуття сигналу з різних джерел до слухача може різнитись на десятки мілісекунд. Це спричиняє *фазові інтерференції* — часткове ослаблення або підсилення певних частотних діапазонів. Такі ефекти знижують чіткість звучання, особливо при накладанні сигналів основного масиву та delay-зон. Для їх компенсації використовуються цифрові процесори керування затримками (delay management) та фазова корекція у середовищі Lake Controller.
- Частотні провали та піки, спричинені інтерференцією хвиль. Вони виникають унаслідок взаємодії звукових хвиль, що відбиваються від конструкцій сцени, трибун чи стін. У результаті формуються зони стоячих хвиль, де відбувається нерівномірність частотної характеристики. Це особливо помітно у низькочастотному діапазоні (40–200 Гц), де навіть незначні зміщення підсилювачів або сабвуферів можуть кардинально змінити акустичну картину. Аналіз таких зон проводився за допомогою Room EQ Wizard, що дозволило ідентифікувати резонансні частоти та скоригувати їх параметричним еквалайзером.

Узагальнюючи, зазначені чинники призводять до зниження розбірливості мови, спотворення тембрового балансу музичних сигналів та зменшення загальної комфортності сприйняття звуку слухачами. Усунення цих недоліків можливе лише за умови поєднання акустичних вимірювань, математичного моделювання та практичного досвіду налаштування звукових систем.

3. Сучасні технології вимірювання, аналізу та моделювання

У процесі дослідження було апробовано сучасні програмні комплекси MAPP 3D, SMAART v9 та Room EQ Wizard, які забезпечують високий рівень точності при аналізі, прогнозуванні та оптимізації акустичних параметрів звукових систем. Використання цих інструментів дозволило комплексно

дослідити поведінку звукових хвиль у реальному просторі та в умовах комп'ютерного моделювання.

Застосування MAPP 3D (Modeling Array Performance Platform) дало можливість створити тривимірну модель акустичного поля, визначити рівень звукового тиску (SPL) на площині слухачів і спрогнозувати вплив різних конфігурацій масиву ще до його фактичного монтажу. Завдяки цій платформі виявлено оптимальні кути нахилу систем line array, зони перекриття випромінювання та області з потенційними фазовими втратами. Це дозволило мінімізувати необхідність постмонтажних корекцій і підвищити ефективність звукового покриття.

Програмне середовище SMAART v9 використовувалось для вимірювання амплітудно-частотних (АЧХ) та фазових характеристик систем у реальному часі. Застосування методу подвійного аналізу (transfer function) дало змогу точно визначити часові затримки між зонами, виявити частотні дисбаланси та узгодити сигнали різних джерел. Таким чином, SMAART став ключовим інструментом у процесі калібрування delay-зон і фазового узгодження акустичних систем.

Для детального аналізу акустичних характеристик приміщень додатково було використано Room EQ Wizard (REW). Ця програма забезпечила візуалізацію часу реверберації RT60, виявлення резонансних мод у низькочастотному діапазоні та визначення зон стоячих хвиль. Зібрані дані дозволили створити більш точну модель поведінки звуку у просторі та оптимізувати параметри системи шляхом тонкої еквалізації.

Узагальнюючи результати застосування зазначених технологій, можна стверджувати, що поєднання моделювання (MAPP 3D) і практичних вимірювань (SMAART, REW) формує ефективну методику акустичного аналізу. Вона забезпечує об'єктивність оцінки, знижує ймовірність суб'єктивних помилок під час налаштування та дозволяє досягати стабільного звукового результату незалежно від складності простору.

4. Оцінка ефективності технічних рішень

Практичний аналіз довів, що якість акустичного середовища масових заходів значною мірою залежить від грамотної інтеграції сучасних технічних засобів — цифрових мікшерних пультів, систем лінійного масиву (line array), delay-зон і програмних інструментів фазової корекції. Саме поєднання цих елементів дозволяє створити стабільну, передбачувану та контрольовану звукову структуру в умовах різних майданчиків.

Застосування цифрового мікшерного пульта Allen & Heath SQ-6 забезпечило високу точність керування сигналом завдяки використанню 96-кілогерцової обробки, малим затримкам (менше 0,7 мс) та можливості збереження сцен для різних форматів подій. Цей пульт дозволив гнучко працювати з еквалізацією, динамічною обробкою та маршрутизацією сигналів для основної системи, сабвуферів і delay-зон.

Використання акустичних систем line array dB Technologies VIO L208 показало високу ефективність у формуванні спрямованого звукового поля. Завдяки вертикальному куту покриття та можливості налаштування горизонтальної дисперсії забезпечено рівномірний розподіл звукового тиску (SPL) по глибині слухацької зони. Модульна конструкція системи дозволила гнучко адаптувати кількість елементів і геометрію під конкретний простір, що мінімізувало зони перевантаження та тіньові ділянки звуку.

Важливу роль у підвищенні чіткості звучання відіграло впровадження delay-зон — додаткових акустичних точок, розташованих на значній відстані від основного масиву. Вони були налаштовані з урахуванням часових затримок, розрахованих через SMAART і Lake Controller, що дозволило синхронізувати звукові хвилі з основним джерелом і уникнути ефекту “ехо” або фазового зсуву.

Ключовим елементом системного налаштування став Lake Controller — програмно-апаратний комплекс для точного контролю DSP-процесорів. Його застосування дало змогу здійснити фазову та частотну корекцію у режимі реального часу, побудувати акустичні фільтри з високою точністю та адаптувати систему під конкретні акустичні умови. Використання інструментів Mesa EQ і

Group Delay Alignment у Lake Controller дозволило досягти оптимальної фазової когерентності між усіма зонами системи.

У результаті дослідження доведено, що інтеграція цифрових мікшерів, систем line array, delay-зон і процесорного керування створює максимально контрольоване акустичне середовище, у якому звук характеризується стабільністю, рівномірністю та високим ступенем розбірливості. Такий підхід дозволяє уникнути потреби у громіздких акустичних екранах або додаткових ревербераційних пастках, оскільки баланс досягається переважно завдяки точним технічним налаштуванням.

5. Практичне впровадження на прикладі компанії Alpha Group

Практична частина дослідження, виконана на базі компанії Alpha Group, (див. Додаток 15), засвідчила, що системний і поетапний підхід до підготовки акустичного середовища є ключовим чинником забезпечення високої якості звуковідтворення під час масових заходів. Компанія реалізує повний цикл робіт — від попереднього аналізу простору та комп'ютерного моделювання до постмонтажного калібрування систем у реальних умовах. Такий підхід дозволяє мінімізувати акустичні ризики ще на етапі планування події.

Передмонтажна підготовка включає моделювання акустичного поля в середовищі MAPP 3D, що дає можливість передбачити розподіл рівня звукового тиску, визначити оптимальні кути розгортання масиву, розташування delay-зон і потенційні проблемні області залу. Це значно скорочує час монтажу та кількість подальших коригувань.

Після інсталяції проводиться система вимірювань і калібрування за допомогою програм SMAART v9 і Room EQ Wizard, у поєднанні з вимірювальними мікрофонами Earthworks M23, що забезпечують надзвичайно точну передачу сигналу в усьому частотному діапазоні. Ці інструменти дозволяють отримати об'єктивні дані щодо амплітудно-частотної та фазової характеристики кожної зони прослуховування, після чого здійснюється цифрова корекція затримок і рівнів сигналу.

Особливу увагу приділено налаштуванню delay-зон і параметричній еквалізації, які здійснюються через Lake Controller або безпосередньо з пульта Allen & Heath SQ-6. Така процедура забезпечує узгодження фазових характеристик між основними і затриманими системами, вирівнювання звукового тиску та усунення частотних піків і провалів.

Результати практичного впровадження показали, що при правильному застосуванні сучасних вимірювальних технологій і цифрових систем керування можливо досягти акустичної стабільності навіть у складних архітектурних або відкритих просторах. Усі заходи, реалізовані компанією Alpha Group, характеризувалися рівномірним покриттям, високою розбірливістю мови й точністю відтворення музичного матеріалу.

Таким чином, практичний досвід компанії підтвердив ефективність розробленої у дослідженні методології, що ґрунтується на інтеграції моделювання, вимірювання та калібрування звукових систем як єдиного технологічного процесу.

Оптимізація звукових систем для масових заходів виявилася багаторівневим процесом, що поєднує технічні, просторові й організаційні чинники та потребує комплексного підходу. У ході дослідження встановлено, що ефективно акустичне середовище починає формуватися ще на етапі попереднього планування, коли здійснюється моделювання майданчика, враховуються геометрія простору, розташування сцени та зон розміщення слухачів. Використання спеціалізованих програмних комплексів на зразок MAPP 3D дає змогу ще до монтажу системи спрогнозувати розподіл звукового тиску, виявити потенційні «мертві зони», оцінити вплив віддалених ділянок та підібрати оптимальні положення основних акустичних масивів і delay-зон. Такий підхід дозволяє мінімізувати ризики перевантаження центральної частини простору та недостатнього рівня звуку на периферії, що є типовими проблемами масштабних заходів.

Практичний досвід компанії Alpha Group показав, що одним із ключових чинників досягнення рівномірного звукового поля є грамотний вибір

конфігурації акустичних систем і їх правильна взаємодія між собою. Застосування line array систем dB Technologies VIO L208 з ретельно підібраними кутами розкриття та балансом по рівню забезпечує стабільний розподіл енергії як у горизонтальній, так і у вертикальній площинах. Важливу роль відіграє також коректна організація delay-зон, які мають бути синхронізовані за часом і фазою з основним масивом. Використання процесорів і програмного забезпечення на зразок Lake Controller дає змогу точно налаштувати затримки та фазові співвідношення між різними групами гучномовців, що суттєво зменшує ризик виникнення гребінчастої фільтрації й фазових спотворень у зоні слухачів.

Наступним важливим етапом оптимізації є перевірка налаштувань за допомогою акустичних вимірювань. Застосування вимірювальних мікрофонів класу Earthworks M23 у поєднанні з програмами аналізу, такими як SMAART v9 та Room EQ Wizard, дозволяє здійснювати детальний спектральний, часовий і фазовий аналіз роботи системи в реальних умовах майданчика. Результати вимірювань дають можливість оцінити рівномірність розподілу звукового тиску (SPL) у слухацькій зоні, контролювати відхилення по рівню в межах нормативних значень та визначити параметри часу реверберації RT60, які мають відповідати акустичному призначенню простору. Для концертних залів середнього об'єму й конференц-холів доцільним є досягнення таких параметрів, за яких реверберація не погіршує розбірливість мовлення та музичного матеріалу, а навпаки підтримує природність звучання.

На основі отриманих даних реалізується етап тонкого налаштування системи, що включає параметричну еквалізацію, корекцію проблемних частотних ділянок та додаткову фазову лінеаризацію. Формування корекційних кривих з урахуванням особливостей конкретного майданчика дає змогу згладити надмірні підйоми і провали у частотній характеристиці та досягти більш збалансованого звучання в різних точках простору. Використання сучасних DSP-рішень та процесорів забезпечує не лише корекцію амплітудно-частотної характеристики, а й точне узгодження фазових характеристик між основною

системою та delay-зонами, що створює ефект єдиного джерела звуку, незважаючи на множинність акустичних точок.

Окремо варто наголосити на організаційних аспектах, які безпосередньо впливають на результат оптимізації звукових систем. Ефективність технічних рішень значною мірою залежить від злагодженої роботи звукорежисера, системного інженера та всієї технічної команди. Надання достатнього часу на монтаж, первинне налаштування, проведення вимірювань і контрольні прослуховування, а також на репетиції із залученням виконавців, дає змогу виявити й усунути потенційні проблеми ще до початку заходу. Практика Alpha Group засвідчує, що поєднання об'єктивних даних вимірювань із суб'єктивною оцінкою досвідченого звукорежисера дозволяє адаптувати систему до жанрових особливостей події та очікувань аудиторії, забезпечуючи високий рівень комфорту для слухачів.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що оптимізація звукових систем для масових подій повинна базуватися на цілісному підході, в якому попереднє 3D-моделювання, точна конфігурація та калібрування акустичних систем, ретельний акустичний аналіз із використанням сучасного програмного забезпечення, параметрична еквалізація і фазова корекція доповнюються високим рівнем організації роботи технічної команди. Саме комплексне впровадження цих рішень забезпечує досягнення стабільної якості аудіовідтворення, підвищує розбірливість і природність звучання та сприяє формуванню позитивного слухачького досвіду на масштабних заходах.

6. Рекомендації щодо оптимізації звукових систем для покращення якості аудіовідтворення на масових подіях

1. Оптимізація просторового розміщення звукових систем

- Використання лінійних масивів (line array)

Забезпечує контрольовану спрямованість та рівномірний розподіл звукового тиску у великих та довгих просторах. Дозволяє мінімізувати провали та піки SPL на різних відстанях.

- Створення delay-зон

Необхідні для компенсації закону обернених квадратів у великих просторах. Delay-системи повинні бути *строго фазово й часово синхронізовані* з основним масивом, що попереджає інтерференцію та «ехові» ефекти.

- Контроль спрямованості систем

Рекомендується застосовувати системи зі змінною або керованою діаграмою спрямованості, щоб уникати небажаних відбиттів від стін і стелі та зменшувати акустичний «перелив» у зони, де звук не потрібен.

2. Алгоритми цифрової корекції

- Точна еквалізація (EQ)

Використання параметричної еквалізації для корекції мод приміщення, усунення резонансів та балансування частотного спектра.

- Фазове вирівнювання (phase alignment)

Необхідне між:

- основною системою та delay-зонами
- сабвуферними кластерами
- окремими елементами масиву

Порушення фазової узгодженості веде до comb filtering та втрати чіткості.

- Точне налаштування затримок сигналу

Мінімізує інтерференцію та забезпечує акустичну когерентність у просторі.

3. Використання акустичних матеріалів і дифузорів

- Поглинальні матеріали

Застосовувати для зменшення надмірної реверберації та усунення проблем ранніх відбиттів у закритих просторах.

- Дифузійні елементи

Допомагають уникати флатер-ехо, покращують рівномірність звукового поля та природність звучання.

- Низькочастотний контроль

Для уникнення накопичення енергії НЧ бажано використовувати бас-пастки або кардіоїдні/енд-файр сабвуферні конфігурації.

4. Використання сучасних систем вимірювання

- Проведення вимірювань SPL, RT60, STI, FFT

Дає змогу створити об'єктивну акустичну модель простору й контролювати якість звуку.

- Застосування імпульсних характеристик (impulse response)

Дозволяє визначити ранні відбиття, час реверберації та інші параметри.

- Постійна перевірка фазових характеристик системи

Є критичною умовою для уникнення інтерференційних артефактів.

5. Адаптація налаштувань залежно від типу простору та чисельності аудиторії

- Для відкритих просторів: акцент на контролі спрямованості,

компенсації втрат енергії, розподілених delay-зонах.

- Для закритих просторів: акцент на боротьбі з реверберацією,

фокусуванням відбиттів, використанням матеріалів.

- Для комбінованих просторів: поєднання методів обох підходів, часте

використання дифузорів та фазової корекції.

6. Використання сучасних систем вимірювання

- Комплексна взаємодія архітектурних, технічних і

психоакустичних чинників (важливо, оскільки цей принцип підкреслений у теоретичних висновках документа).

- Поєднання моделювання та реальних вимірювань

Моделювання у MAPP 3D, EASE або інших інструментах має передувати інсталяції систем.

- Когерентність усіх елементів звукової системи
Будь-які помилки у часі або фазі призводять до суттєвих спотворень у великому просторі.
- Гнучкість системи звукопідсилення Система повинна бути адаптованою до змінних умов (кількість глядачів, погодні умови, геометрія сцени).

Для підвищення якості аудіовідтворення на масових подіях доцільно застосовувати багаторівневий підхід, що включає:

- оптимізацію розміщення акустичних систем (line array, delay-зони, спрямованість);
- цифрову обробку сигналів (EQ, фазова корекція, затримки);
- акустичний дизайн простору (поглинання + дифузія);
- використання вимірювальних систем (SMAART, REW, Lake Controller);
- адаптацію налаштувань під конкретний тип простору та аудиторію.

Так сформована система забезпечує рівномірність звукового поля, високу розбірливість, відсутність спотворень і комфортне сприйняття звуку незалежно від масштабу події.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Beranek, L. Acoustics. New York: McGraw-Hill, 1954 (перевид.: Acoustical Society of America, 1986).
2. Beranek, L., & Mellow, T. Acoustics: Sound Fields and Transducers. Academic Press, 2012.
3. Barron, M. Auditorium Acoustics and Architectural Design. E & FN Spon, 1993 (2nd ed., 2010).
4. Kuttruff, H. Room Acoustics (6th ed.). CRC Press, 2017.
5. Long, M. Architectural Acoustics (2nd ed.). Elsevier / Academic Press, 2014.
6. Rossing, T. D. (ed.). Springer Handbook of Acoustics. Springer, 2014/2015 (оновл. Вид. 2019).
7. Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V. Fundamentals of Acoustics (4th ed.). Wiley, 2000.
8. Morse, P. M., & Ingard, K. U. Theoretical Acoustics. Princeton University Press, 1968 (репринти дотепер).
9. Blauert, J. Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization. MIT Press, 1997 (ревізії 2013).
10. Everest, F. A., & Pohlmann, K. C. Master Handbook of Acoustics (6th ed.). McGraw-Hill, 2015.
11. Newell, P. Recording Studio Design (3rd ed.). Focal Press / CRC, 2013.
12. Rumsey, F., & McCormick, T. Sound and Recording: An Introduction (8th ed.). Routledge, 2017.
13. Huber, D. M., & Runstein, R. E. Modern Recording Techniques (10th ed.). Focal Press / CRC, 2023.
14. Toole, F. Sound Reproduction: The Acoustics and Psychoacoustics of Loudspeakers and Rooms (3rd ed.). CRC Press, 2017.
15. Eargle, J. The Microphone Book: From Mono to Stereo to Surround (3rd ed.). Focal Press, 2012 (перевид. 2016).
16. Davis, D., & Patronis, E. Sound System Engineering (4th ed.). Focal Press / CRC, 2013.

17. Ballou, G. (ed.). Handbook for Sound Engineers (5th ed.). CRC Press, 2015/2016.
18. Howard, D., & Angus, J. Acoustics and Psychoacoustics (5th ed.). Routledge, 2020.
19. Beranek, L. Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture (2nd ed.). Springer, 2004 (оновл. Перевид. 2018).
20. ISO 3382-1:2009. Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 1: Performance spaces.
21. IEC 60268-16:2020. Sound system equipment — Part 16: Objective rating of speech intelligibility by STI.
22. ANSI / ASA S1.4-2014 (R2019). Specification for Sound Level Meters.
23. ITU-R BS.1770-4/-5. Algorithms to measure audio programme loudness and true-peak audio level.
24. EBU R128 та EBU Tech 3341–3344 (гучність, вимірювання, практичні настанови).
25. AES75-2022. AES Standard for Acoustics — Measuring loudspeaker maximum linear sound levels using noise.
26. AES3-2003 (r2009/2020). AES standard for digital audio engineering — Serial transmission format for two-channel linearly represented digital audio data.
27. Meyer Sound. MAPP 3D User Guide. Berkeley, CA: Meyer Sound Laboratories, 2023.
28. Rational Acoustics. Smaart v9 User Guide. Connecticut: Rational Acoustics, 2022.
29. Room EQ Wizard (REW). User Manual. [Help.roomeqwizard.com](http://help.roomeqwizard.com) (онлайн-довідник).
30. d&b audiotechnik. ArrayCalc / R1 / NoizCalc — Technical Documentation (актуальні версії; офіційні white papers).
31. Soundcraft Ui24R — User Guide. Harman Professional.

32. Sennheiser EW-D — Operating Instructions / Frequency Management Guidelines. Sennheiser Electronic GmbH.
33. Alto Professional Trouper — User Manual / Specifications. Alto Professional.
34. Yamaha. The Yamaha Sound Reinforcement Handbook (Gary Davis, Ralph Jones). Yamaha Music / Hal Leonard, 1989/1990.
35. Shure. Wireless Microphone Systems — Application Guides (ULX-D, QLX-D, Axient Digital). Shure Inc.
36. Allen & Heath. SQ Series — Reference Guide. Allen & Heath Ltd., 2023.
37. Rumsey, F. Spatial Audio (2nd ed.). Focal Press, 2012.
38. Holman, T. Surround Sound: Up and Running (2nd ed.). Focal Press, 2007.
39. Izhaki, R. Mixing Audio: Concepts, Practices and Tools (3rd ed.). Focal Press, 2017.
40. Watkinson, J. The Art of Sound Reproduction. Focal Press, 1998 (перевид. 2001).
41. Newell, P., & Holland, K. Loudspeakers: For Music Recording and Reproduction (2nd ed.). Focal Press / CRC, 2018.
42. Meyer Sound — офіц. Сайт: <https://meyersound.com>
43. Rational Acoustics — офіц. Сайт: <https://www.rationalacoustics.com>
44. Yamaha Professional Audio — офіц. Сайт: <https://proaudio.yamaha.com>
45. d&b audiotechnik — офіц. Сайт: <https://www.dbaudio.com>
46. Shure Audio Institute / Training — офіц. Ресурс: <https://www.shure.com/en-US/training>
47. AES (Audio Engineering Society) — офіц. Сайт: <https://aes.org>
48. Christian Heil (L-Acoustics) — автор теорії Wavefront Sculpture Technology;
49. Hill, Salter, Murphy — теорії сабвуферних кардіоїдних та енд-файр масивів

ДОДАТКИ

Додаток 1

Графічні ілюстрації параметрів синусоїдальних хвиль та їх впливу на звукові сигнали.

Додаток 1.1 Базова синусоїда.

На графіку зображено синусоїдальний сигнал як фундаментальну форму звукової хвилі. Демонструється плавна періодична зміна амплітуди, що лежить в основі математичного опису гармонічних коливань. Показано один повний цикл хвилі, що є базовим елементом для аналізу складних акустичних процесів.

Додаток 1.2 Варіації частоти синусоїдальної хвилі.

На ілюстрації наведено три хвилі з різними частотами: початкова (базова), хвиля з удвічі вищою частотою та хвиля з удвічі нижчою частотою. Порівняння демонструє, як зміна частоти впливає на щільність циклів у часі та, відповідно, на висоту сприйнятого звуку.

Додаток 1.3 Варіації амплітуди синусоїдального сигналу.

Графік показує вплив зміни амплітуди на форму хвилі: одна хвиля має амплітуду, удвічі більшу за базову, інша — удвічі меншу. Амплітуда визначає інтенсивність звуку або рівень звукового тиску, тому такі ілюстрації демонструють фізичні основи формування SPL у реальних акустичних системах.

Додаток 1.4 Синусоїдальний сигнал із різними амплітудними та часовими параметрами.

На зображенні показано два цикли змінної напруги, що слугують прикладом практичного застосування формального опису хвилі через період T , амплітуду та частоту f . Цей рисунок відображає реальну форму електроакустичного сигналу, що може моделювати поведінку звукової хвилі в аналогових і цифрових системах.

Додаток 1.5 Вплив постійної складової (DC Offset) на синусоїду.

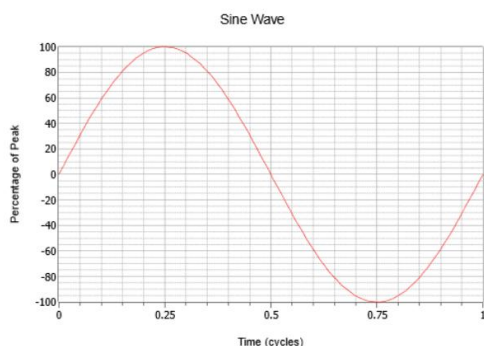
Демонструється, як додавання позитивного або негативного рівня постійної напруги зміщує хвилю по вертикальній осі. DC Offset не змінює

частоту та форму змінної складової, але впливає на симетрію сигналу, що у акустиці може призводити до спотворень при підсиленні та відтворенні.

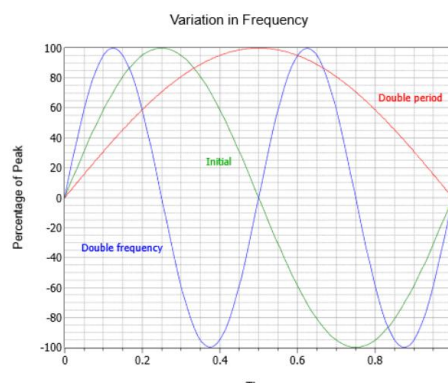
Додаток 1.6 Вплив фазового зсуву.

Зображено три хвилі з однаковою частотою, але різними фазовими зсувами: одна випереджає еталонну на 45° , інша відстає на $22,5^\circ$. Показано, як зсув фаз змінює положення максимумів і мінімумів сигналів у часі. Це явище є ключовим для розуміння інтерференції, ефекту «гребінки» та фазової узгодженості акустичних систем.

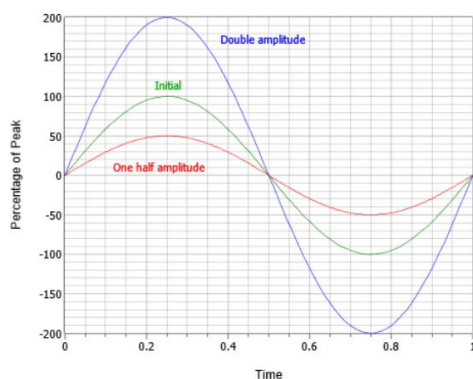
Представлені графіки ілюструють фундаментальні властивості звукових хвиль — частоту, амплітуду, фазу, період, зміщення та їх взаємозв'язки. Ці параметри становлять основу теоретичного аналізу акустичного середовища й використовуються у всіх подальших розділах для пояснення поведінки звуку в складних просторових умовах масових заходів. У додатку зібрано матеріали, що наочно демонструють математичні та фізичні процеси, описані в розділі 1.3.



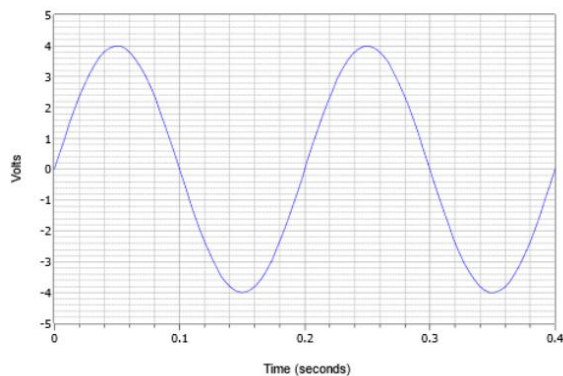
Додаток 1.1



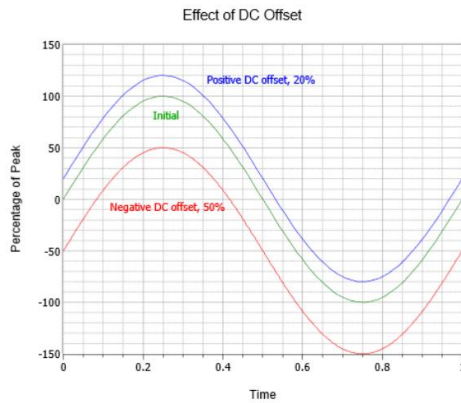
Додаток 1.2



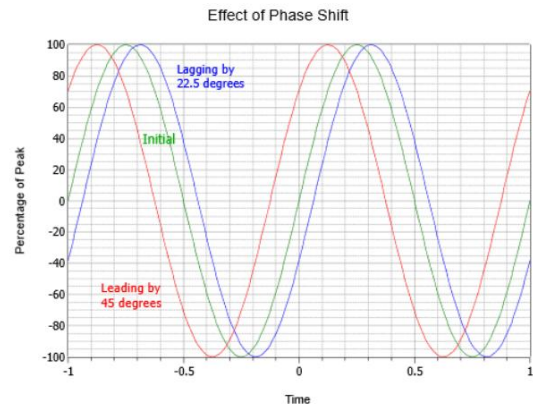
Додаток 1.3



Додаток 1.4



Додаток 1.5



Додаток 1.6

Додаток 2

Графічні ілюстрації процесів інтерференції та дифракції звукових хвиль

Додаток 2.1 Дифракція звукових хвиль на перешкоді

На зображенні показано огинання хвилями краю перешкоди — характерний прояв дифракції. Хвильовий фронт змінює форму, утворюючи зони послаблення та підсилення звукового тиску. Цей ефект пояснює, чому у великих залах та відкритих просторах звук може бути чутним навіть за об'єктами, які перекривають прямий шлях хвилі.

Додаток 2.2 Інтерференція двох хвиль однакової частоти з частковим фазовим зсувом

На схемі подано два синусоїдальні сигнали, що накладаються з невеликим фазовим зсувом. Результуюча хвиля демонструє нерівномірну амплітуду, що є наслідком інтерференції. Подібні фазові взаємодії є причиною появи «мертвих зон» та частотних провалів у великих акустичних просторах.

Додаток 2.3 Інтерференція хвиль різної частоти

Зображено накладання низькочастотної та високочастотної хвиль. Результуючий сигнал має складну структуру амплітудних коливань, що створює ефект «биттів» та спектральної модуляції. Це явище проявляється у просторі, коли відбиті хвилі взаємодіють із прямим звуком, спричиняючи складні спотворення, що відчуються слухачем.

Додаток 2.4 Конструктивна інтерференція (підсилення хвиль)

На рисунку показано ситуацію, коли дві хвилі сумуються у фазі, тобто їхні максимуми та мінімуми збігаються. У результаті амплітуда результуючого сигналу збільшується вдвічі. Конструктивна інтерференція є основою принципів спрямованості лінійних масивів та сабвуферних кластерів.

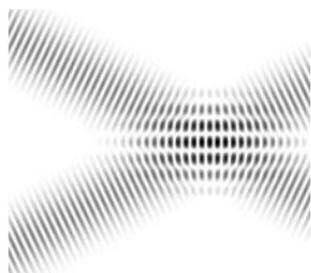
Додаток 2.5. Чергування конструктивної та деструктивної інтерференції

На графіці зображено взаємодію двох хвиль різних частот і довжин.

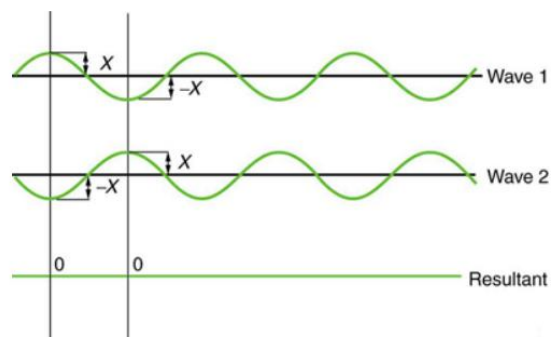
Показано періоди:

- **Destructive** — коли хвилі взаємно послаблюють одна одну;
- **Constructive** — коли відбувається підсилення.

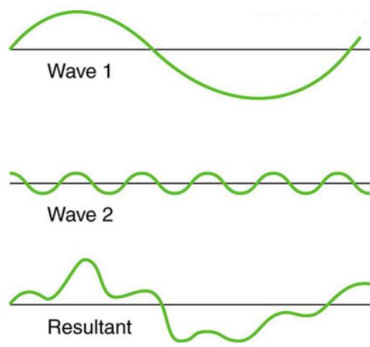
Такий «пульсуючий» характер зміни амплітуди є типовим проявом частотної інтерференції й пояснює нерівномірність звукового поля у великих приміщеннях або при неправильному розміщенні акустичних систем.



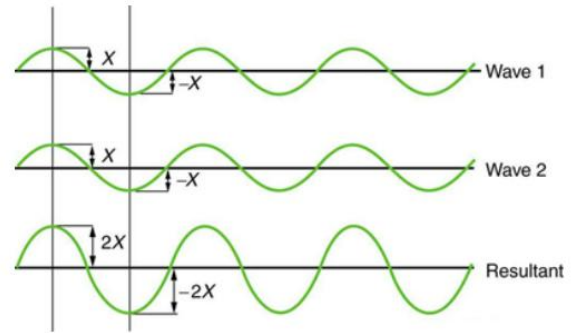
Додаток 2.1



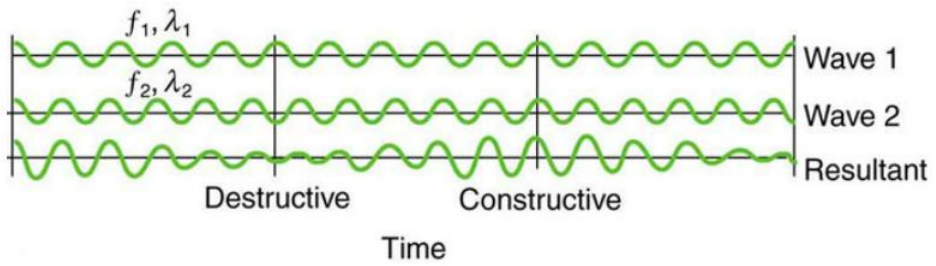
Додаток 2.2



Додаток 2.3



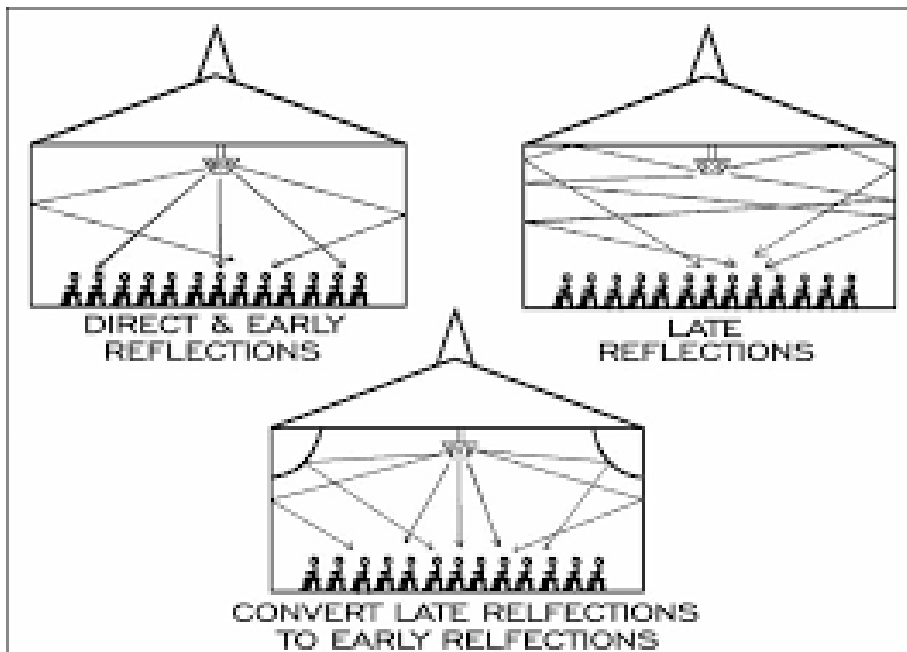
Додаток 2.4

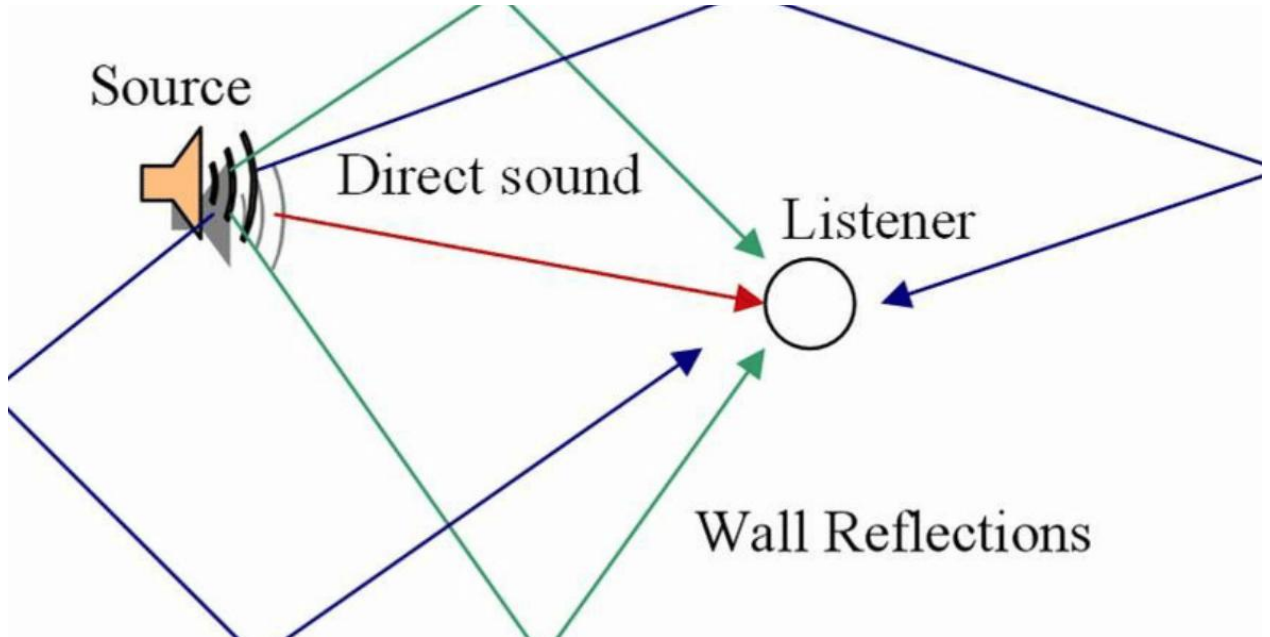
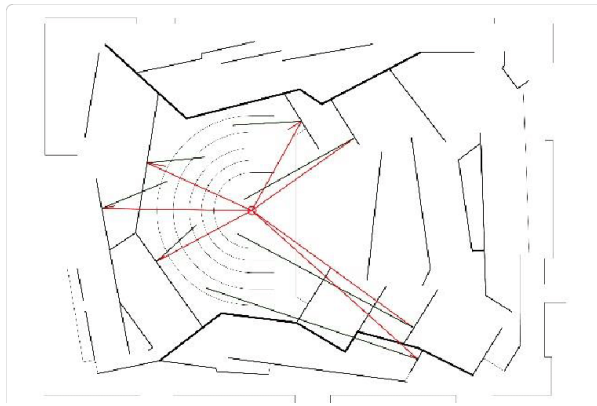


Додаток 2.5

Додаток 3

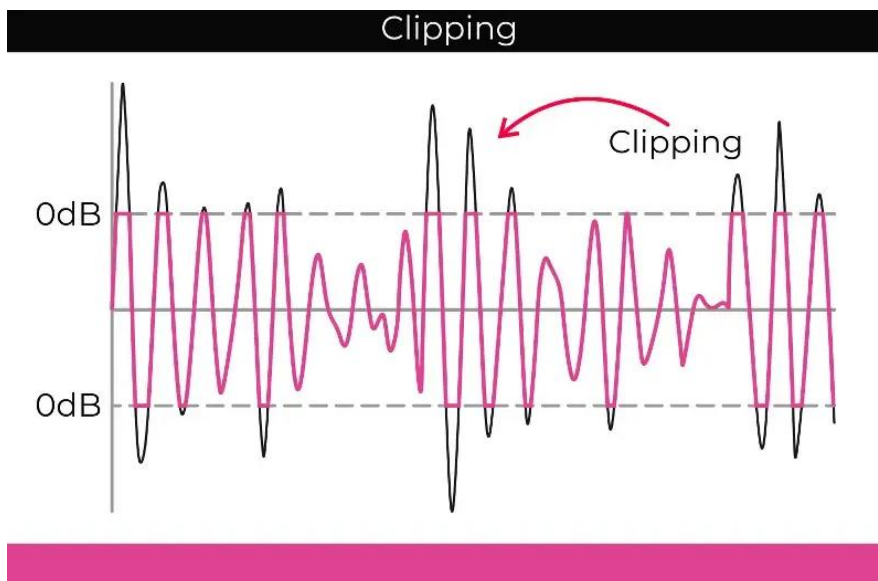
Основні принципи акустичного проектування сценічних та глядацьких просторів

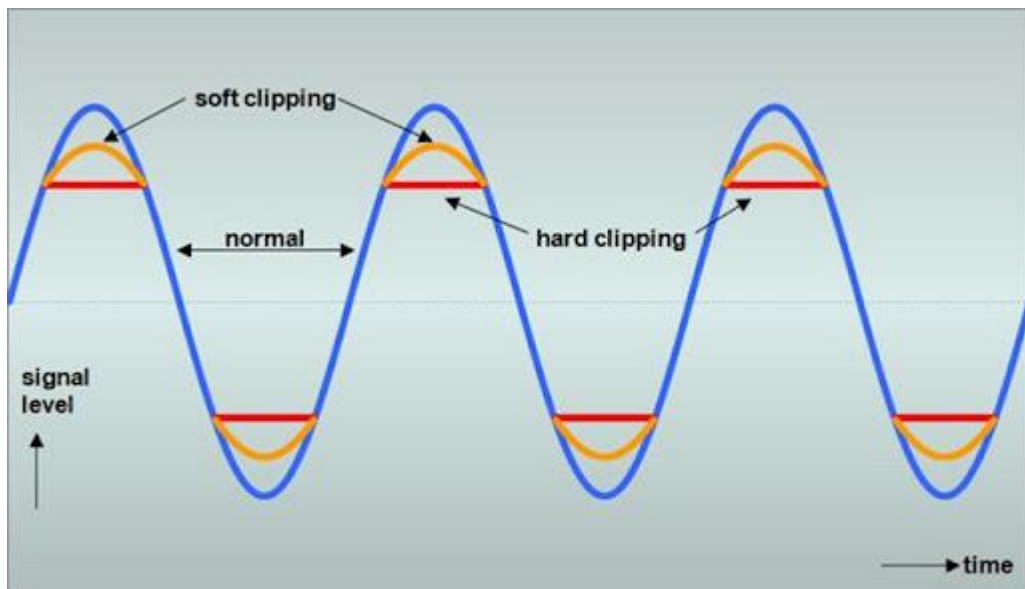




Додаток 4

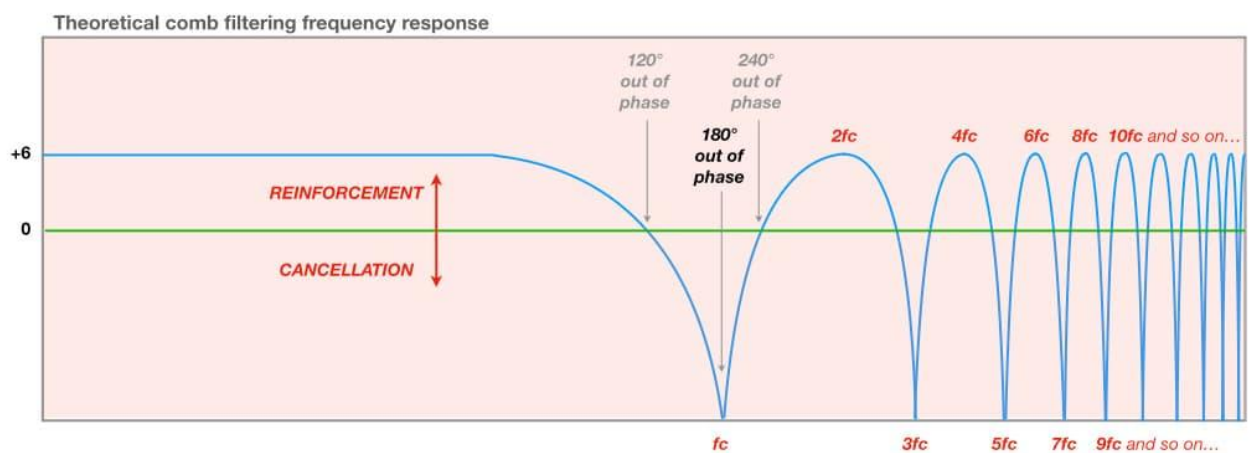
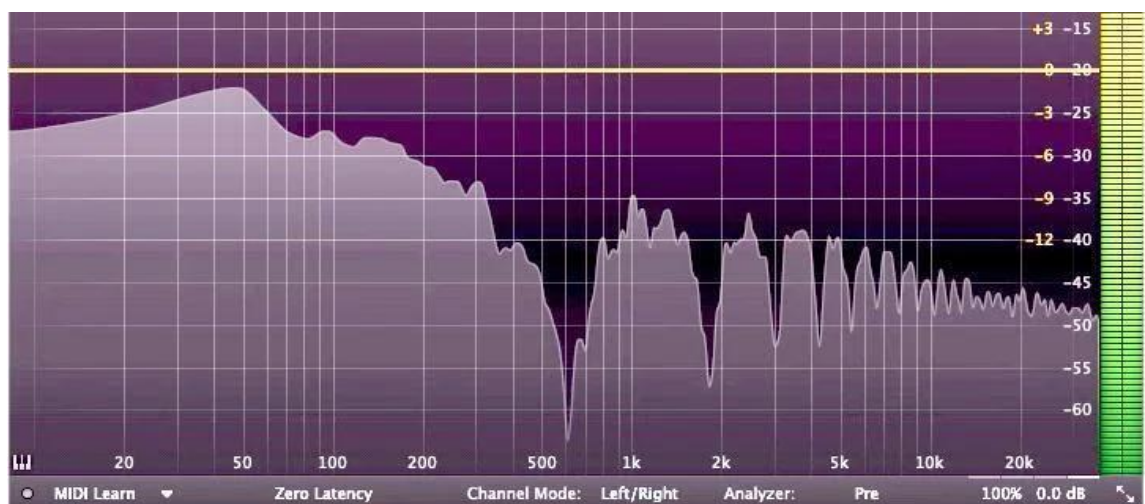
Амплітудних спотворення - кліпінг (clipping)



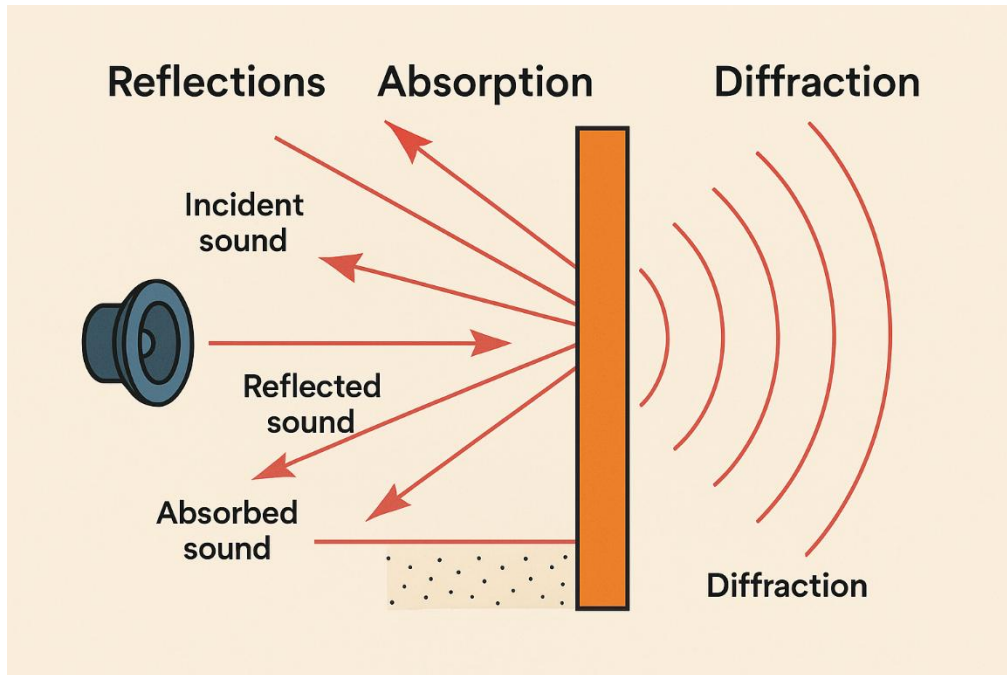


Додаток 5

Comb filtering

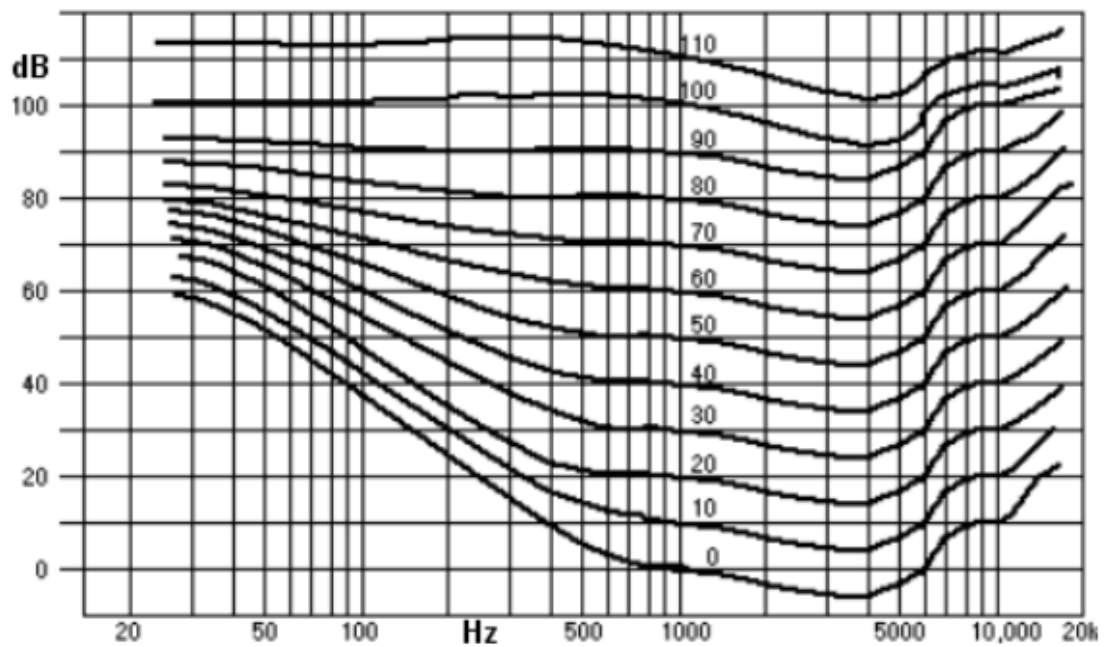


Додаток 6



Додаток 7

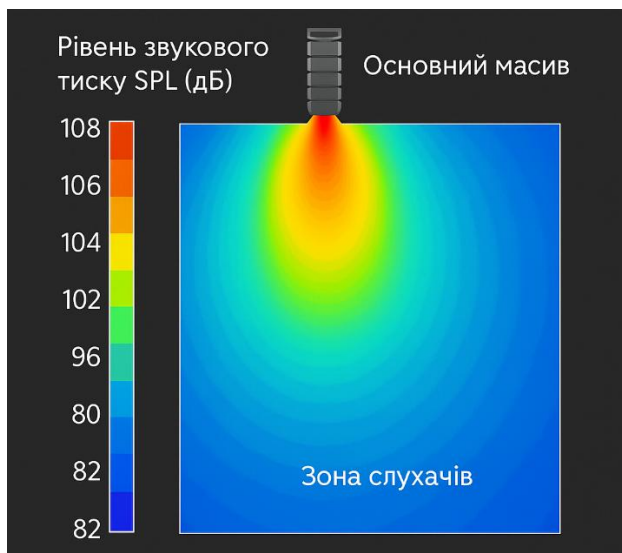
Психоакустична крива Флетчера-Мансона (криві рівної гучності)



Додаток 8

Моделювання системи у програмі MAPP 3D

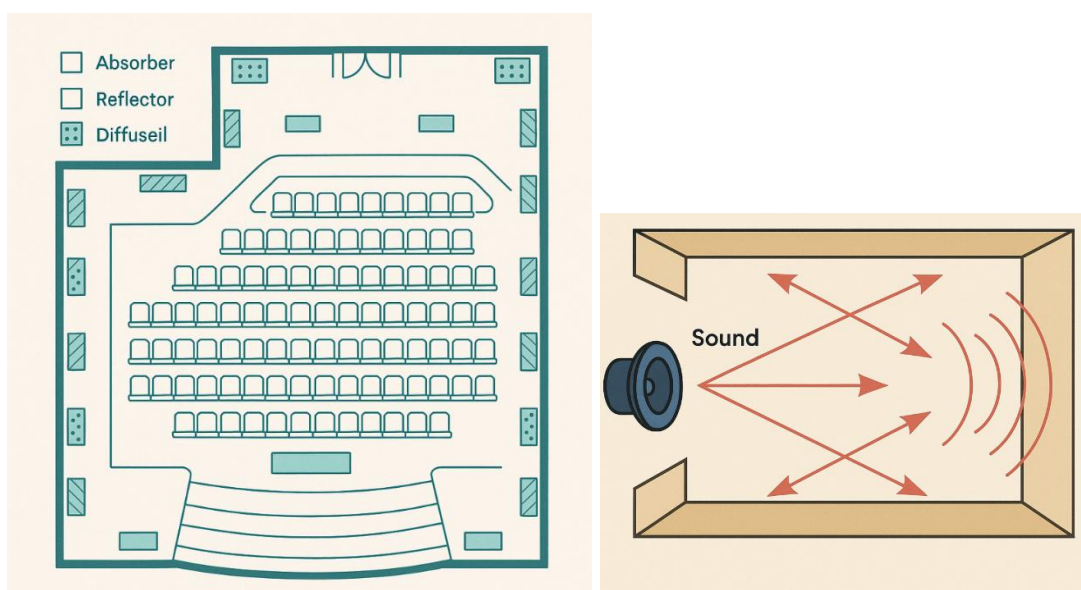
візуалізація акустичного поля, створена у середовищі MAPP 3D. Показано рівень звукового тиску на площині слухачів при різних кутах нахилу масиву.



Додаток 9

Карта акустичного оформлення простору

схема демонструє вплив архітектурно-матеріальних факторів на формування звукового поля, а також принципи розміщення акустичних елементів для корекції середньо- і високочастотних відбиттів.



Додаток 10

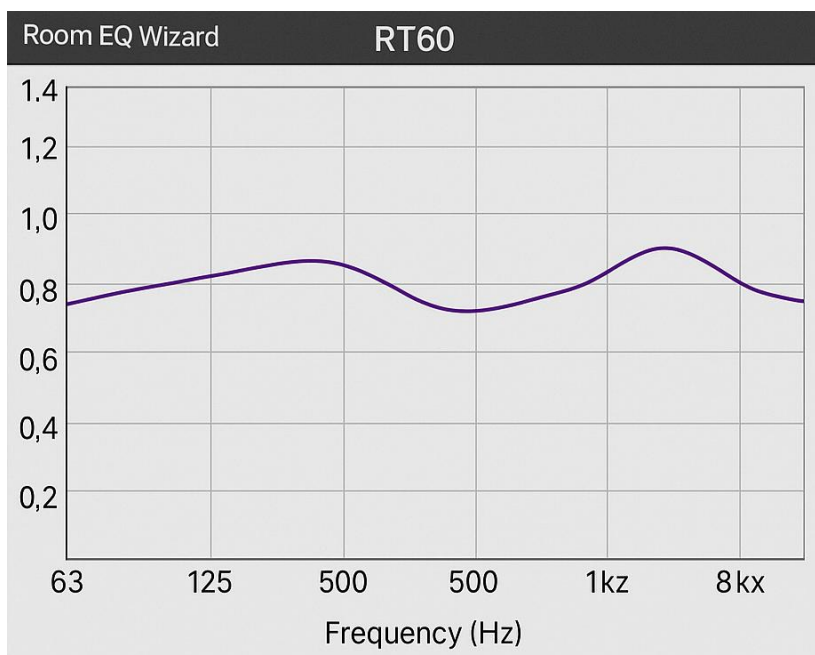
Таблиця рівнів звукового тиску (SPL) у різних точках зали

№ точки	Відстань від FOH (м)	SPL (дБ)	Коментар
1	3	97	зона головного масиву
2	10	94	центр залу
3	18	91	межа delay-зони
4	25	88	задня зона слухачів

Додаток 11

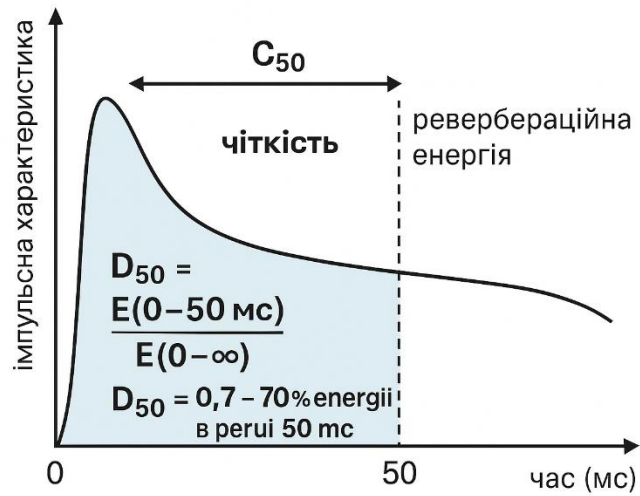
Графік часу реверберації RT60

показано тривалість затухання звуку (RT60) у різних частотних діапазонах для зали середнього об'єму.



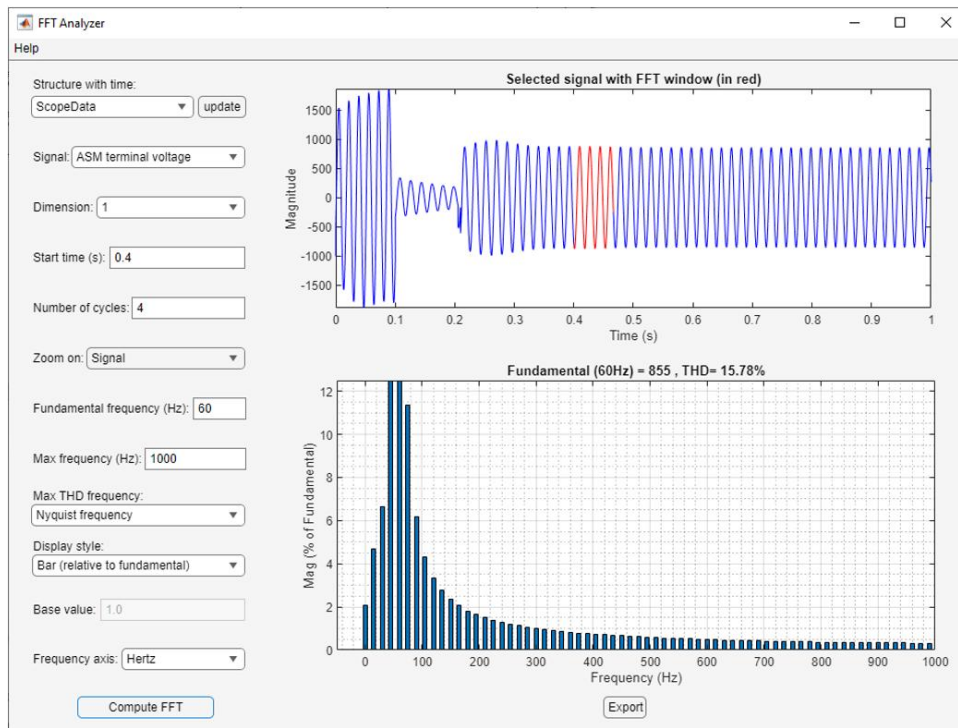
Додаток 12

Аналіз параметрів C50 і D50



Додаток 13

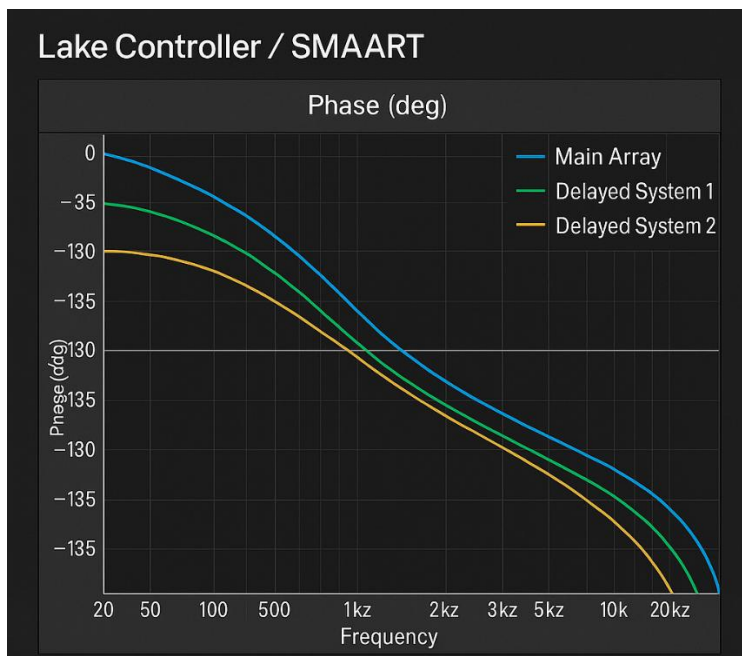
FFT-аналіз та автоматична калібровка звукової системи



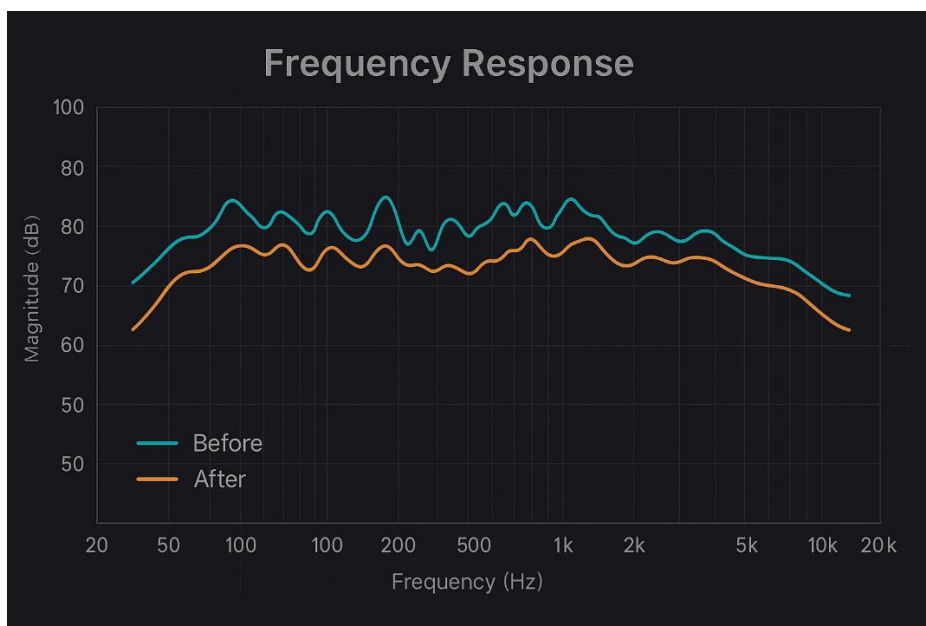
Додаток 14

Фазова корекція системи у Lake Controller

зображено процес калібрування delay-зон шляхом фазового узгодження основного масиву та затриманих систем.



Частотна характеристика системи до та після налаштування порівняльний графік відображає корекцію спектру звуку після застосування еквалізації та фазового вирівнювання.



Додаток 15

Фото з реальних заходів компанії Alpha Group

світлина ілюструють практичне застосування описаних методів під час реальних подій (технічне забезпечення, налаштування акустики, контроль якості звучання)



