

ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ АКУСТИЧНОЇ ГОЛОГРАФІЇ БЛИЖНЬОГО ПОЛЯ

Євгеній Пономаренко

аспірант кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, jenyaynex@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6799-7664

Кирило Трапезон

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, kirill.trapezon@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5873-9519

Акустична голографія ближнього поля як один зі способів візуалізації акустичного поля має різноманітні приклади застосування в багатьох сферах сучасної науки і техніки. Методи та підходи, які пов'язані з акустичною голографією, широко використовуються в різних інженерних сферах прикладної акустики. Зокрема, задачі які пов'язані з обмеженням чи зменшенням рівня шуму в приладах та машинах із віброакустичними елементами конструкцій, можна розв'язати на основі підходів акустичної голографії ближнього поля. Розглядається алгоритм для розрахунку з елементами процедур вимірювання основних характеристик акустичного поля, яке створюється джерелом шуму плоскої чи циліндричної конструкції на основі підходів акустичної голографії ближнього поля. Наявність цього алгоритму дає змогу інженеру спроектувати схему з визначення точного місця розташування джерела шуму, його характеристик у разі, коли традиційні методи вимірювання визначаються технологічними труднощами і не враховують особливості конструкції цього джерела шуму. Проведено практичний експеримент з отримання основних акустичних характеристик поля, яке створюється у ближній зоні джерелом шуму, для конструкції фюзеляжу літака Boeing 777-200. Наведено схему розташування мікрофонів для реєстрації даних та показано елементи розрахунку акустичного поля для створеної геометрії. Окрім цього, показано схему вимірювання, яка надає можливість отримати візуалізацію поля акустичного тиску на основі побудови акустичної голограми ближнього поля. Проведено порівняння між розрахованими та отриманими на основі вимірювань значень поля акустичного тиску (спектру) для двох варіантів розміщення площини вимірювання (3 мм та 8 мм). Отримано, що за віддалення від площини розташування джерела шуму в ближній зоні проявляється шумовий складник спектру (так званий фоновий шум) під час вимірювання мікрофонами, і особливо це помітно на діапазоні >500 Гц.

Ключові слова: акустична голографія, шум, акустичний тиск, мікрофон, вібрація, коливальна швидкість, ефективність.

Актуальність роботи. Акустична голографія, як і традиційна оптична голографія, вирізняється високою інформативністю даних, тобто інформація, яка записана на двовимірній поверхні (голограмі), може бути достатньою для опису всього тривимірного хвильового поля, яке створюється в системі під час випромінювання від джерела звуку акустичної інформації. В основі використання акустичної голографії є теорія вивчення випромінювання звуку в середовищі, яким можуть бути повітря або вода.

Акустична голографія як спосіб візуалізації акустичного поля з'явилася у 1980 р., коли інженери-дослідники з NASA розробили комплекс обладнання, на основі якого, використовуючи теорію гідроакустики, можна було б реєструвати контури підводних апаратів. Сьогодні

прикладні застосування акустичної голографії в науці і техніці є досить поширеними, і серед них варто відзначити широке використання голограм у медичній та освітній діяльності людства. Так, у медичній галузі голографія ближнього поля дуже часто використовується для створення тривимірних моделей органів та тканин людини, а це, своєю чергою, дає змогу медичним фахівцям проводити більш точну діагностику перед хірургічним утручанням, зменшуючи тим самим ризик для самих пацієнтів. Окрім того, голографічна візуалізація може бути використана для навчання медичного персоналу та розвитку віртуальних тренажерів. Методи та підходи, які пов'язані з акустичною голографією, широко використовуються і в інших інженерних сферах прикладної акустики. Зокрема, задачі, які пов'язані з обме-

женням чи зменшенням рівня шуму в транспортних засобах, приладах та машинах із віброакустичними елементами конструкцій, теж можна розв'язати на основі підходів акустичної голографії. Відомо, що виявлення та усунення причини створення шуму в приладах та машинах різного призначення можуть значно підвищити функціонування останнього. Слід зазначити, що дослідження, які пов'язані з визначенням джерела шуму в конструкціях, можуть бути значно ускладнені через складні вимірювальні умови або коли є недоступність місць вимірювання. Наприклад, така ситуація може зустрітися під час дослідження кабіни літальних апаратів чи внутрішнього салону автомобіля. Ба більше, під час конструювання літальних апаратів [1] проблема забезпечення низького рівню шуму в кабіні може бути однією з основних. І тут визначення області шумового контакту виходячи з форми кабіни може виявитися доволі складною технологічною процедурою. З іншого боку, у деяких ситуаціях на практиці під час використання традиційних методів вимірювання, які не враховують форму або конструкцію джерела шуму, унаслідок значного числа відбивальних поверхонь, як, наприклад, у кабіні літака, картина акустичного оточення може бути неточною. Для успішного вирішення цієї проблеми можна використати підходи акустичної голографії ближнього поля, де передбачити вимірювання величини звукового тиску в близькій зоні структури кабіни, яка створює шум у замкненому просторі.

Іншим практичним прикладом застосування акустичної голографії можна вважати її використання під час проведення експериментів з ультразвукового неруйнівного контролю напівпровідникових пластин. Так, в основі тестової системи є зразок, який необхідно дослідити на наявність поверхневої тріщини [2].

Цікаве практичне застосування акустичної голографії міститься в роботі [3]. Так, автори, щоб показати практичну цінність використання акустичних голограм, пропонують розглядати смартфон як прилад шумового випромінювання та вібрацій. Тобто цей електронний пристрій є джерелом небажаних коливань та шуму і виходячи з його складу, насамперед наявності конденсаторів, і може бути причиною до зниження якості розмови між абонентами в технологіях мобільного зв'язку. Для аналізу шуму, а точніше шумової карти джерела, у роботі використано підходи на основі акустичної голографії ближнього поля [4]. Додатково в дослідженні зазна-

ється, що акустична голографія ближнього поля визначає методику, за якою можна побудувати 3D-акустичне поле тиску на основі проведених двовимірних акустичних вимірювань у ближній зоні [5].

Постановка завдання. Для отримання точної просторової візуалізації звукового поля на основі методики побудови акустичних голограм дослідники використовують різні математичні моделі. В основі створення цих моделей визначено різні методи, за якими можна визначити характеристики акустичного поля (акустичний тис, коливальна швидкість та інтенсивність звуку), яке створюється джерелом. Кінцевим результатом цих методів є розрахунок власних значень або власних векторів (k -простір). Серед переліку цих методів у літературі найбільш часто зустрічаються такі [1; 6; 7]: метод скінчених елементів; метод граничного елемента; метод функції Гріна; метод найменших квадратів; метод на основі передаточної функції; метод еквівалентного джерела [8]. Недоліком цих методів, насамперед, є те, що необхідно розробити математичний апарат, який би враховував особливості конструкції джерела шуму. Окрім цього, наведені методи можуть мати обмеження, якщо йдеться про випромінювання акустичних сигналів у ближній зоні. Наслідком цього можуть бути обмеження акустичної роздільної здатності в області нижніх частот.

Наприклад, метод граничного елемента [6] під час побудови акустичних голограм визначається складною інтерполяцією та громіздкими обчислювальними операціями. Метод еквівалентного джерела у своїй постановці використовує показники корекції Тихонова задля точного отримання характеристик джерела. А це, своєю чергою, теж призводить до додаткових умов під час розрахунку акустичних характеристик поля. Метод найменших квадратів має складний розрахунок і низьку точність, коли джерело шуму не сферичної форми [6]. Найбільш перспективним методом із погляду простоти та гнучкості з дотриманням необхідної точності під час отримання акустичних голограм у ближньому полі в області низьких частот і з необхідною роздільною здатністю та визначеними розмірами апертури уявляється модифікований метод на основі швидкого перетворення Фур'є.

Метою статті є розроблення алгоритму для розрахунку основних характеристик акустичного поля, яке створюється джерелом шуму плоскої чи циліндричної конструкції на основі методики акустичної голографії ближнього поля. Для

досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання:

- наведення співвідношень для отримання основних характеристик акустичного поля для двох видів конструкції джерела шуму;
- розроблення алгоритму дій із використання методики побудови акустичних голограм ближнього поля;
- проведення практичного експерименту з отримання основних акустичних характеристик джерела шуму та аналіз їх точності в рамках підходів методики акустичної голографії ближнього поля.

Матеріал і результати досліджень. Акустична голографія ближнього поля передбачає проведення вимірювань, які пов'язані з визначенням характеристик джерела шуму задля визначення, насамперед, його точного місцерозташування. Як конструкції цього джерела шуму виділяють найчастіше коливальні структури плоскої або циліндричної форми [1]. Основними ж характеристиками джерела, які дають змогу отримати повну картину акустичного оточення, можна вважати такі: розподіл акустичного тиску навколо джерела; розподіл коливальної швидкості частинок; розподіл інтенсивності шуму. Задля упорядкування аналізу цих параметрів в основі методики для точної візуалізації джерела шуму визначено побудову акустичних голограм у ближньому полі від цього джерела шуму. За цих умов, вочевидь, обов'язковою умовою є врахування відстані від джерела шуму до площини голограми та визначення верхньої частоти функціонування джерела, на якій проводяться вимірювання.

Акустична голографія ближнього поля пов'язана з процедурами двомірного швидкого перетворення Фур'є для аналізу даних вимірювання на поверхні площини голограми через відповідні коефіцієнти Фур'є. Такий підхід дає змогу сформувати простір власних хвильових чисел за умови, що джерело шуму розглядається як певна коливальна конструкція з визначеною формою. Сама ж акустична голограма її отримання пов'язана з вимірюваннями характеристик акустичного поля в окремих точках, які розташовані на поверхні цієї голограми поблизу джерела шуму.

Кількість точок вимірювання на поверхні площини голограми визначається відповідно до теорему Найквіста – Шеннона. Для реєстрації характеристик акустичного поля навколо джерела шуму в [9] пропонується використовувати найпростіші приймачі – акустичні елементи (мікрофон, моно-

полі, вібродатчики, датчики інтенсивності звуку), які розміщуються у просторі поверхні голограми. Відзначимо, що збільшення числа приймачів акустичних сигналів може призвести до спотворення акустичного поля, яке створюється джерелом шуму. Причиною цього є залежність приймача, його характеристик та хвилі, яка розповсюджується від об'єкта вимірювання.

Методику застосування акустичної голографії ближнього поля можна визначити на основі алгоритму, який складається з чотирьох етапів:

- вимірювання тиску чи коливальної швидкості для набору точок вимірювання на поверхні акустичної голограми;
- розрахунок частотних коефіцієнтів (спектру) на основі швидкого перетворення Фур'є і подальше знаходження власних хвильових чисел;
- множення спектру на зворотні коефіцієнти для визначення тиску чи розподілу швидкості на поверхні аналізу, яка має відповідати поверхні джерела;
- проведення зворотного перетворення Фур'є для побудови дійсного простору джерела шуму.

При цьому значення тиску акустичного поля в будь-якій точці області вимірювань можна отримати через суперпозицію полів, отриманих від елементів вимірювання на площині голограми.

Розглянемо варіанти отримання голограм на основі визначення акустичних параметрів поля джерела (акустичний тиск, коливальна швидкість, інтенсивність шуму, поле власних чисел) для випадків, коли саме джерело шуму є конструкцією двох видів – плоскої і циліндричної форм. При цьому запис зображення коливальної швидкості та акустичного тиску навколо джерела у формі акустичної голограми будемо виконувати, орієнтуючись на етапи:

- запис амплітуди акустичного тиску (коливальної швидкості) на поверхні, що охоплює джерело (циліндрична форма), або на поверхні, яка є плоскою і розташована на певній відстані від джерела;
- фільтрація отриманих значень акустичних параметрів;
- оцифрування отриманих даних;
- аналіз отриманих даних для візуалізації джерела та визначення його особливостей.

Акустична голографія ближнього поля (варіант 1). Визначимо основні співвідношення та схему вимірювання даних для побудови акустичної голограми у разі, коли джерело шуму являє собою плоску коливальну структуру. Ува-

жається, що візуалізація поля акустичного тиску проводиться попереду цієї коливальної структури. Плоска акустична голограма в даному разі – певна площина точок вимірювання, і їх кількість, як було зазначено вище, визначається на основі теореми Найквіста – Шеннона. Мікрофони як елементи вимірювання параметрів являють собою плоску ґратку і розташовані так, що відстань між ними в обох напрямках дорівнює $l = 0.04$ м. За цих умов верхня гранична частота вимірювання дорівнюватиме:

$$f_g = \frac{c_0}{2l} = \frac{343}{2 \cdot 0.04} = 4287 \text{ Гц.}$$

Відстань від площини голограми до поверхні джерела виберемо на рівні $0,04$ м.

Для візуалізації акустичного тиску навколо плоского джерела шуму використаємо швидке перетворення Фур'є [7]:

$$\tilde{F}(k_x, k_y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy;$$

$$F(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{F}(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y.$$

Відповідне хвильове рівняння для акустичного тиску $p(x, y, z)$ матиме вигляд:

$$\frac{d^2 W}{dz^2} + k_z^2 W = 0, \quad (1)$$

де $k_z^2 = k^2 - k_r^2$; $k_r^2 = k_x^2 + k_y^2$. На основі метода Фур'є відкидаємо часовий множник і розв'язок рівняння (1) матиме вигляд:

$$W = A e^{ik_z z},$$

де

$$k_z = \sqrt{k^2 - k_r^2}, \text{ якщо } k^2 > k_r^2;$$

$$k_z = i\sqrt{k_r^2 - k^2}, \text{ якщо } k^2 < k_r^2.$$

У наведених співвідношеннях параметр k – хвильове (власне) число. Виберемо площину вимірювання (акустичну голограму), яка розташована в просторі за $z = z_h$, площина джерела при цьому буде розташована у просторі за $z = z_{\text{дж}}$. Відзначимо, що z – значення будь-якої площини візуалізації.

Припустимо, що

$$z_h > z_{\text{дж}} > 0;$$

$$z > z_{\text{дж}},$$

тоді функція перетворення поля акустичного тиску $p_h(x, y, z_h)$ для голограми ближнього поля матиме вигляд:

$$\tilde{p}_h(k_x, k_y, z_h) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p_h(x, y, z_h) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy,$$

і тоді функція перетворення акустичного тиску в будь-якій точці поля визначається як

$$\tilde{p}(k_x, k_y, z) = \tilde{p}_h e^{ik_z(z-z_h)}.$$

Зворотнє перетворення акустичного тиску в будь-якій точці поля z можна визначити так:

$$p(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}_h e^{ik_z(z-z_h)} e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y. \quad (2)$$

Поле вектору швидкості в точці z визначається за формулами:

$$\vec{v} = \frac{1}{i2\pi f \rho} \vec{\nabla} p; \quad (3)$$

$$v_x = \frac{1}{(2\pi)^2 f \rho} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k_x \tilde{p}_h e^{ik_z(z-z_h)} e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y;$$

$$v_y = \frac{1}{(2\pi)^2 f \rho} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k_y \tilde{p}_h e^{ik_z(z-z_h)} e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y;$$

$$v_z = -\frac{1}{(2\pi)^2 f \rho} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k_z \tilde{p}_h e^{ik_z(z-z_h)} e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y,$$

де f – частота; ρ – щільність середовища.

Інтенсивність поля в точці z

$$\tilde{I} = \frac{1}{2} \chi \{ p \vec{v}^* \},$$

де \vec{v}^* – комплексно-спряжена частина v ; χ – дійсна частина комплексного виразу в дужках.

Перейдемо до визначених інтегралів по апертурі площини вимірювання або поверхні вимірювання. Нехай $2l_x$ та $2l_y$ – розміри апертури для проведення вимірювань, тобто:

$$-l_x \leq x \leq l_x;$$

$$-l_y \leq y \leq l_y,$$

тоді параметри dx та dy (просторове збільшення) визначаються як

$$dx \rightarrow \Delta x = \frac{l_x}{M};$$

$$dy \rightarrow \Delta y = \frac{l_y}{N},$$

де M, N – дискретні номери крапок, де проводяться вимірювання уздовж довжин апертури l_x та l_y відповідно. Тобто можна визначити так:

$$x = \alpha \Delta x = \frac{\alpha l_x}{M}, \quad -M \leq \alpha \leq M;$$

$$y = \beta \Delta y = \frac{\beta l_y}{N}, \quad -N \leq \beta \leq N.$$

Тоді власні числа можна знайти за формулою

$$k_x = m \Delta k_x = \frac{m \pi}{l_x}; \quad -M \leq m \leq M;$$

$$k_y = n \Delta k_y = \frac{n \pi}{l_y}; \quad -N \leq n \leq N.$$

Схема вимірювання. Для забезпечення точної візуалізації поля акустичного тиску рекомендується створювати голограму, яка відрізняється за розмірами щонайменше у шістьразів від поверхні джерела шуму [10]. Це зумовлено тим, щоб не втратити деталі за межами області апертури і не втратити деталі під час візуалізації акустичного поля за межами цієї області апертури.

Дані для створення акустичної голограми отримуються з лінії або прямокутного масиву мікрофонів. Кожен мікрофон, який розташований в області поверхні голограми, реєструє амплітуду та фазу акустичного тиску і створюються, таким чином, канали запису інформації. Усі канали запису мають бути індивідуально відкалібровані по відношенню до джерела сигналів. Кожен канал запису має власний програмований підсилювач, фільтр (1/3 октавний) та аналогово-цифровий перетворювач (щонайменше 12 біт) і модуль пам'яті. Центральна частота фільтру та перетворювача мають бути однакові для всіх каналів. Мікрофони слід вибирати такі, щоб забезпечити дискретність 0,1 дБ за амплітудою та 01 градуса за фазою.

Нехай кожна акустична голограма складається з $N \times N$ крапок вимірювання, що визначає її роздільну здатність та апертуру. Для простору власних чисел розмір голограми із запасом масштабується до розміру $4N \times 4N$, щоб отримати підвищення роздільної здатності зображення поля. Далі комп'ютерна програма створює візуалізацію поля тиску, коливальної швидкості та інтенсивності звуку з даних голограми.

Акустична голографія ближнього поля (варіант 2). Це методика візуалізації поля тиску, коли структура джерела має циліндричну форму. Акустична голограма при цьому також буде являти собою циліндричну поверхню з точок вимірювання.

Нехай циліндрична поверхня джерела визначається розмірами: l – довжина; $2R$ – діаметр. Поле акустичного тиску записується на поверхні циліндричної голограми за умови радіуса $R_0 > R$. Значення акустичного тиску p та вектор коли-

вальної швидкості \vec{v} в координаті простору (r, φ, z) можна визначити зі співвідношень:

$$\tilde{p}(r, \varphi, z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in\varphi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(r_0, k_z) \cdot \frac{Z_n(k_r r)}{Z_n(k_r r_0)} e^{ik_z z} dk_z;$$

$$\vec{v}(r, \varphi, z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in\varphi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{p}(r_0, k_z) \cdot Q_n e^{ik_z z} dk_z,$$

де

$$\text{для } v_r: Q_n = \frac{i}{k r c_0} \frac{1}{2\pi} (k r) \frac{Z'_n(k_r r)}{Z_n(k_r r_0)} \vec{e}_r;$$

$$\text{для } v_\varphi: Q_n = \frac{i}{k r c_0} \frac{1}{2\pi} \left(\frac{-in}{r} \right) \frac{Z'_n(k_r r)}{Z_n(k_r r_0)} \vec{e}_\varphi;$$

$$\text{для } v_z: Q_n = \frac{i}{k r c_0} \frac{1}{2\pi} (-ik_z) \frac{Z'_n(k_r r)}{Z_n(k_r r_0)} \vec{e}_z,$$

штрих у наведених співвідношеннях означає похідну за аргументом функцію. Радіальне хвильове число k_r пов'язане з хвильовим числом k_z [11] залежністю

$$k_r = \sqrt{k^2 - k_z^2}, \quad |k| > |k_z|.$$

Функція Z_n можна визначити як

$$Z_n = H_{(n)}^{(1)}(k_r r),$$

де $H_{(n)}^{(1)}$ – функція Ганкеля першого роду.

Щоб реалізувати наведений алгоритм для побудови акустичної голограми скінчених розмірів, візуалізація значення акустичного тиску на циліндричній поверхні площини голограми довжиною z_0 і радіусом r_0 проводиться на однаковій відстані за осьовими та окружними точками, де кутове зміщення $\Delta\varphi$ та осьове зміщення Δz визначається як

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\bar{N}};$$

$$\Delta z = \frac{z_0}{\bar{M}},$$

де $\bar{N} = 2N + 1$; $\bar{M} = 2M + 1$ – цілі числа і являють собою загальну кількість точок вимірювання в окружному та осьовому напрямках на основі критерію Найквіста – Шеннона.

Швидке перетворення Фур'є на основі значень із циліндричної голограми $\tilde{p}(r_0, \varphi, z)$ в точках вимірювання φ_l та z_q матиме вигляд:

$$\hat{p}_n(r_0, k_{z,m}) = z_0 \sum_{q=-M}^M \sum_{l=-N}^N \tilde{p}(r_0, \varphi_l, z_q) e^{-i\left(\frac{2\pi}{M}\right)qm} e^{-i\left(\frac{2\pi}{N}\right)l \cdot n}.$$

Обговорення. Внутрішню частину фізеляжу літака Boeing 777-200 наведено на рис. 1.



Рис. 1. Внутрішня частина корпусу літака

У внутрішній частині кабіни літального апарату додано вимірювальні елементи – мікрофони. Позиції мікрофонів позначені чорними крапками. За розташуванням цих елементів утворюється плоска поверхня. Мікрофони розташовано по поверхні так, щоб по площині фіксувати рівень звукового тиску джерела шуму, який знаходиться в наступному відсіку літака (керуючі приводи літального апарату). У рамках експерименту будемо аналізувати шумові сигнали, які знаходяться в низькочастотному діапазоні. Мікрофони розміщуються на спеціальній балочній конструкції (не показано на рисунку), яка не з’єднана з основною конструкцією фюзеляжу літака. Для експерименту візьмемо мікрофони GRAS 40HL із низьким рівнем власного шуму. На рис. 1 межі моделі з масиву мікрофонів співпадають з алюмінієвою обшивкою корпусу секції літака.

Як уже було відзначено вище, приймемо, що відстань між мікрофонами становить 0,04 м. А це означає, що найкоротша довжина хвилі, яка розповсюджується від джерела, на основі теореми Найквіста – Шеннона буде дорівнювати 0,08 м. Кількість мікрофонів на рис. 1 вибрана з розрахунку на те, щоб забезпечити необхідну апертуру під час проведення вимірювання тиску акустичного поля. Необхідність розміщення мікрофонів у центрі поверхні виключається завдяки тому, що мікрофони на краю дають змогу отримати інформацію про внутрішнє звукове поле з досить високою точністю вимірювання [12]. Тобто із цієї роботи випливає, що розрахунок акустичного поля для створеної геометрії можливий виключно лише тоді, коли є значення акустичного тиску на межі цієї геометричної конструкції. Тому передбачається, що акустичне поле в такому разі можна розрахувати на основі набору власних функцій, які відповідають попередньо визначеним граничним умовам, зокрема умовам стосовно розміру апертури. Визначимо для проведення експерименту, що масив із мікрофонів на балочній конструкції може переміщуватися вздовж осі z (вісь розташована горизонтально вздовж корпусу літального апарату). Оскільки аналіз та візуалізація джерела шуму передбачаються у ближній зоні, то для спрощення експерименту нехай джерело шуму розташовано всередині конструкції масиву. Тоді визначимо дві площини: площину голограми (коли $z = z_h$) та площину, на якій візуалізується акустичне поле ($z = z_r$). Схематично ці площини зі збільшенням показано на рис. 2.

Далі, урахувавши, що джерело шуму умовно розташовано в точці $z = 0$, проведемо незалежне

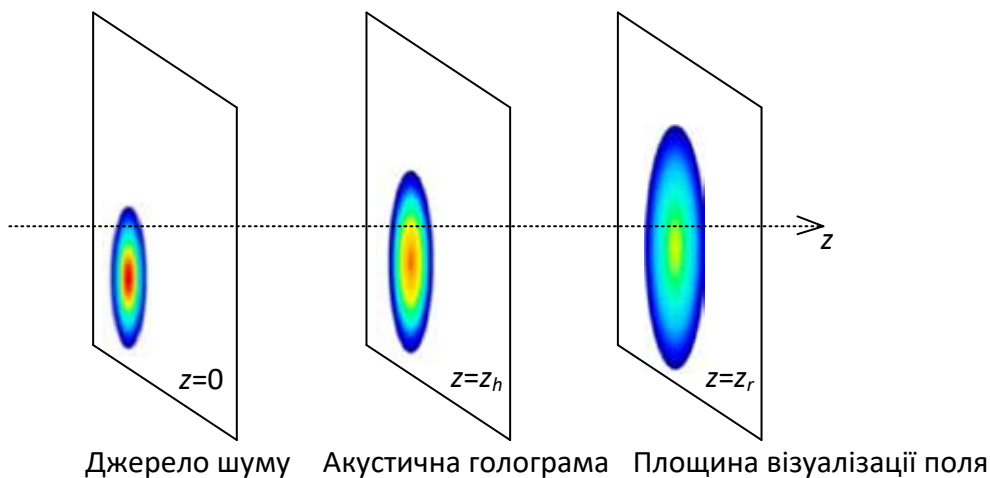


Рис. 2. Схематичне зображення площин вимірювання акустичного тиску

вимірювання рівня акустичного тиску в ближній зоні на відстані 3 мм (площина акустичної голограми) та 8 мм (площина візуалізації акустичного поля на основі проведених розрахунків акустичного поля (2) за формулами) в діапазоні від 0 до 5 кГц. Перевірка точності побудови акустичної голограми можна провести на основі простого порівняння даних, які отримано шляхом вимірювання, та значень, які розраховано аналітичним способом на основі наведених співвідношень. Для розрахунків використаємо програмний додаток Comsol Multiphysics. На рис. 3 та 4 наведено графічні залежності спектрів для поля акустичного тиску у разі значення $z = 3$ мм та $z = 8$ мм, які отримано через вимірювання та на основі розрахунків.

Порівнюючи отримані значення з рис. 3 та 4 на основі проведених вимірювань та за формулами, можна підкреслити, що піки спектрів для акустичного тиску майже співпадають на діапазоні частот від 0 до 4 кГц. Натомість за збільшення відстані z від 3 до 8 мм можна побачити, що збільшується шумовий складник спектру (так званий фоновий шум) під час вимірювання мікрофонами, особливо це помітно на діапазоні >500 Гц.

Аналогічно проведемо вимірювання для рівня коливальної швидкості частинок (нормоване значення), використовуючи формулу (3) та відповідні пояснення. При цьому необхідно додати джерело вібрації додатково, і для цього підключимо впригол електромагнітний вібраційну тестову систему TIRA 4496 lbf. Цей елемент розташуємо ззовні фіюзеляжу і орієнтовно посередині структури корпусу. Таким чином, створимо штучно коливальну вібраційну поверхню. При цьому для спрощення експерименту приймемо, що $z = 0$. Опорне значення швидкості встановимо на рівні 1 мкм/с. Для вимірювання значення швидкості використаємо у схемі безконтактний лазерний доплерівський віброметр LV-1800. Отримані значення відповідають значенням швидкості частинок на площині джерела вібрацій.

З аналізу отриманих залежностей на рис. 5 можна підкреслити майже відповідне сходження спектральних піків між вимірними значеннями та розрахованими. На завершення дослідження наведемо зображення акустичної голограми, площина якої розташована за значення $z = 3$ мм. Для експерименту приймемо, що впригол до поверхні масиву мікрофонів у кабіні з іншого боку (на рис. 1 не показано) є джерело шуму, і необхідно на основі підходів вимірювання

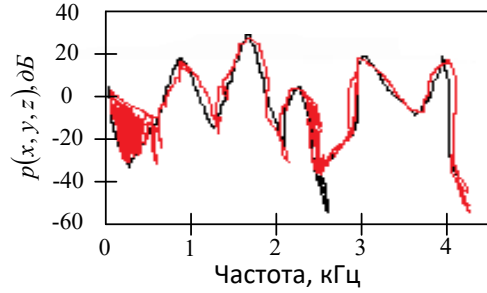


Рис. 3. Схематичне зображення спектрів за $z = 3$ мм: червоний колір – вимірне значення; чорний колір – розрахункове значення

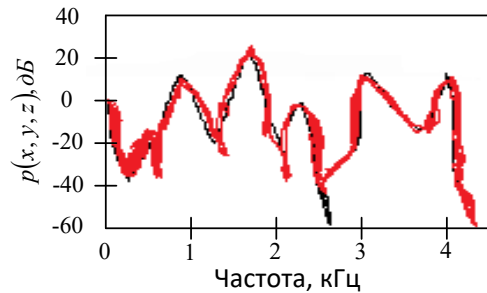


Рис. 4. Схематичне зображення спектрів за $z = 8$ мм: червоний колір – вимірне значення; чорний колір – розрахункове значення

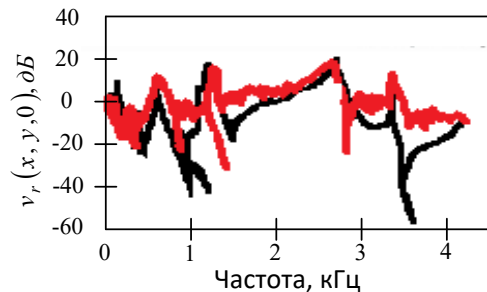


Рис. 5. Схематичне зображення спектра коливальної швидкості частинок: червоний колір – вимірне значення; чорний колір – розрахункове значення

і створення акустичних голограм знайти точне місце розташування джерела та його форму.

Із отриманого зображення голограми на рис. 6 можна побачити, що є певна пляма за рівнем тиску, яка розташована трохи зміщеною від центру масиву мікрофонів. У цій області спостерігається значення акустичного тиску близько 18 дБ. Таким чином, отримане графічне зображення акустичної голограми дає змогу визначити найбільш вірогідне розташування джерела шуму, і до того ж можна спрогнозувати рівень цього шуму.

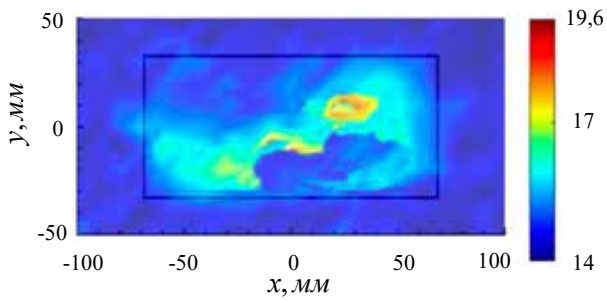


Рис. 6. Схематичне зображення поля акустичного тиску на площині акустичної голограми ($z = 3$ мм)

Висновки. Акустична голографія є зручним інструментом для візуалізації акустичного поля, яке створюється джерелом звуку або шуму в ближній зоні і дає змогу на основі побудованого алгоритму знайти точне місце розташування цього джерела у разі, коли використання традиційних засобів вимірювання є ускладненим або взагалі неможливим. Наведено аналітичні залежності для розрахунку основних характеристик акустичного поля для випадків, коли джерело шуму являє собою плоску або циліндричну форму. Представлено алгоритм проведення практичного експерименту з отримання спектрів розподілу акустичного тиску та складника коливальної швидкості частинок як аналітичним способом, так і на основі вимірювань за умови встановлення конструкції мікрофонів у внутрішній частині фюзеляжу літака. Отримано, що в діапазоні вимірювань від 0 до 4 кГц піки спектрів для акустичного тиску та складника коливальної швидкості частинок майже співпадають. А це, своєю чергою, є підтвердженням адекватності наведених розрахункових співвідношень. На основі методу скінчених елементів через використання програми Comsol Multiphysics побудовано акустичну голограму ближнього поля, площина якої розташована за значення $z = 3$ мм. Отримано, що акустична голограма дає змогу визначити область розташування низько інтенсивного джерела шуму і його орієнтовний рівень шуму (максимум знаходиться біля 18 дБ).

ЛІТЕРАТУРА

1. Ungnad, S., Sachau, D., Wandel, M. et al. Experimental noise source identification in a fuselage test environment based on nearfield acoustical holography. *CEAS Aeronaut J* 12, 793–802 (2021). URL: <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00534-6>.
2. Twerdowski, E., Buttler M., Razek N. et al. Combined surface-focused acoustic microscopy in transmission and scanning ultrasonic holography. *Ultrasonics* 44, 1301-1305 (2007). URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.031>.
3. Park, T., Im, S., Kim, D. et al. Sound visualization of smartphone-radiated noise using nearfield acoustic holography. *J Mech Sci Technol* 36, 3875–3882 (2022). URL: <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0710-9>.
4. D.T. Blackstock, *Fundamentals of Physical Acoustics*, Wiley, New York, Chap. 1 (2009).
5. T.D. Rossing, *Handbook of Acoustics*, Springer, New York, Chap. 25 (2007).
6. Ping, G., Chu, Z., Xu, Z. et al. A refined wideband acoustical holography based on equivalent source method. *Sci Rep* 7, 43458 (2017). URL: <https://doi.org/10.1038/srep43458>.
7. Kirchner, M., Nijman, E. (2016). Cylindrical Nearfield Acoustical Holography: Practical Aspects and Possible Improvements. In: Fuchs, A., Nijman, E., Pribsch, H.H. (eds) *Automotive NVH Technology*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24055-8_4.
8. Chu, Z.G., Ping, G.L., Yang, Y. & Shen, L.B. Determination of regularization parameters in near-field acoustical holography based on equivalent source method. *J. Vibroeng.* 17, 2302–2313 (2015).
9. Chardon G., Daudet L., Peillot A., Ollivier F., Bertin N., Gribonval R. (2012) Near-field acoustic holography using sparse regularization and compressive sampling principles. *J Acoust Soc Am* (JASA) 132(3):1521–1534.
10. K.E. Eschenberg and S.I. Hayek Imaging the Nearfield of a Submerged Plate Using Acoustical Holography, *Proceeding of Symposium on Acoustical Imaging*, Vol. 25, held in Halifax, Canada, pp. 234–248 (July 2005).
11. Трапезон К.О. Узагальнений метод симетрій для задачі про позовжні чи крутильні коливання стрижнів змінної жорсткості. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2021. Вип. 2. С. 94–99. DOI: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2021.2.94-99>.
12. Baker, B., Copson, E.T.: *The mathematical theory of Huygens' principle*. University Press, Oxford (2003).

APPLIED ASPECTS OF NEAR-FIELD ACOUSTIC HOLOGRAPHY

Yevhenii Ponomarenko

Postgraduate Student at the Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, jenyaynex@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6799-7664

Kyrylo Trapezon

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Acoustic and Multimedia Electronic Systems

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, kirill.trapezon@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5873-9519

Purpose. The aim of the paper is to develop an algorithm for calculating the main characteristics of the acoustic field generated by a noise source of a flat or cylindrical structure based on the technique of near-field acoustic holography. **Methodology.** The analytical dependences for determining and calculating the acoustic characteristics of the field presented in this paper are obtained on the basis of the fast Fourier transform relations. The measurement part of the study includes special equipment such as microphones, a test vibration system, and a laser Doppler vibrometer. The image of the acoustic hologram of the neighbor is based on the finite element method, which is included in the Comsol Multiphysics software. **Findings.** Within the framework of the study, a set of actions was developed to obtain and analyze the main characteristics of the acoustic field created by a noise source of a certain shape. It was found that the spectra based on calculations and measurements of acoustic pressure and oscillatory particle velocity in the peaks almost coincide in the range from 0 to 4 kHz. It is shown that the acoustic hologram of the near-field allows to provide an effective and simple answer to the location of the noise source and its intensity level. **Originality.** A practical scheme for measuring the main characteristics of the acoustic field in the near-field for the fuselage of a Boeing 777-200 airplane is presented. A close approximation for the spectra of acoustic pressure and oscillatory velocity is obtained by comparison based on the measurement procedures and analytical calculation. **Practical value.** The presented practical experiment on the location of the microphone structure, external vibration stand and laser Doppler vibrometer can be used in the production of aircraft at the stages of creating an acoustically treated cabin with a low noise level inside. **Conclusions.** Based on the finite element method, an image of an acoustic hologram of the near field was constructed using the Comsol Multiphysics program, the plane of which is located at a distance of 3 mm from the noise source. It was found that the acoustic hologram allows us to determine the location of a low-intensity noise source and its approximate noise level (the maximum is about 18 dB).

REFERENCES

1. Ungnad, S., Sachau, D., Wandel, M. et al. Experimental noise source identification in a fuselage test environment based on nearfield acoustical holography. *CEAS Aeronaut J* 12, 793–802 (2021). URL: <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00534-6>.
2. Twerdowski, E., Buttlar M., Razek N. et al. Combined surface-focused acoustic microscopy in transmission and scanning ultrasonic holography. *Ultrasonics* 44, 1301-1305 (2007). URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.031>.
3. Park, T., Im, S., Kim, D. et al. Sound visualization of smartphone-radiated noise using nearfield acoustic holography. *J Mech Sci Technol* 36, 3875–3882 (2022). URL: <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0710-9>.
4. D.T. Blackstock, *Fundamentals of Physical Acoustics*, Wiley, New York, Chap. 1 (2009).
5. T.D. Rossing, *Handbook of Acoustics*, Springer, New York, Chap. 25 (2007).
6. Ping, G., Chu, Z., Xu, Z. et al. A refined wideband acoustical holography based on equivalent source method. *Sci Rep* 7, 43458 (2017). URL: <https://doi.org/10.1038/srep43458>.
7. Kirchner, M., Nijman, E. (2016). Cylindrical Near-field Acoustical Holography: Practical Aspects and Possible Improvements. In: Fuchs, A., Nijman, E., Priebisch, HH. (eds) *Automotive NVH Technology*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24055-8_4.
8. Chu, Z.G., Ping, G.L., Yang, Y. & Shen, L.B. Determination of regularization parameters in near-field acoustical holography based on equivalent source method. *J. Vibroeng.* 17, 2302–2313 (2015).
9. Chardon G., Daudet L., Peillot A., Ollivier F., Bertin N., Gribonval R. (2012) Near-field acoustic holography using sparse regularization and compressive sampling principles. *J Acoust Soc Am (JASA)* 132(3):1521–1534.
10. K.E. Eschenberg and S.I. Hayek Imaging the Near-field of a Submerged Plate Using Acoustical Holography, *Proceeding of Symposium on Acoustical Imaging*, Vol. 25, held in Halifax, Canada, pp. 234–248 (July 2005).
11. Trapezon, K. (2021). Uzahal'neny metod symetrii dlya zadachi pro pozdovzhni chy krutyl'ni kolyvannya stryzhniv zminnoyi zhorstkosti. *Visnyk KrNU imeni Mykhayla Ostrohrads'koho*, Issue 2, pp. 94–99. [In Ukrainian]
12. Baker, B., Copson, E.T.: *The mathematical theory of Huygens' principle*. University Press, Oxford (2003)

Стаття надійшла 09.06.2023