

## ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ ЯВИЩ У ЗАХИЩЕНИХ ПРИМІЩЕННЯХ

© Кеньо Г.В., Ляшенко М.О., 2015

**Using the physical and technical simulation system Comsol Multiphysics 3.5a distribution of acoustic field in the area of low frequencies in a closed room has been simulated. Resonance frequencies of the simulated room have been calculated and eigenmodes that they represent have been studied. Patterns of acoustic resonances have been investigated. Frequency dependence of sound pressure levels at points location of the source and receiver were obtained.**

**Keywords – acoustic field, Helmholtz equation, eigenfrequencies, sound pressure levels.**

**За допомогою системи фізико-технічного моделювання Comsol Multiphysics 3.5a змодельоване акустичне поле в закритому приміщенні в ділянці низьких частот. Розраховано резонансні частоти змодельованого приміщення та досліджені моди, що їм відповідають. Досліджені закономірності виникнення акустичних резонансів, отримані частотні залежності рівнів звукового тиску у точках розташування джерела та приймача звуку.**

**Ключові слова – акустичне поле, рівняння Гельмгольца, власні частоти, рівень звукового тиску.**

### Вступ

У проблемі організації захищених приміщень (приміщень для конфіденційних переговорів) виділяється низка завдань, які є актуальними з огляду на забезпечення комфортності переговорів та унеможливлення витоку з них мовної інформації, що включає у себе приховування акустичного сигналу, зменшення його рівня в місцях, де ймовірним є перехоплення сигналу, та усунення можливих каналів витоку інформації [1].

При створенні захищених приміщень намагаються враховувати його акустичні властивості. Користуючись статистичною та геометричною теоріями поширення звуку в замкнутих приміщеннях, розглядають акустичне поле в ньому як дифузійне і ревербераційне на відстані, більшій від радіуса лункості ( $\sim 1$  м), і на основі того пропонують методи та способи звукоізоляції приміщень [2,3]. Приміщення для конфіденційних переговорів найчастіше є малими в акустичному сенсі, оскільки у них частота поділу резонансів є великою (в кімнаті  $5 \times 6 \times 3$  м<sup>3</sup>  $f_{ep} = 200$  Гц) і зростає зі зменшенням розмірів приміщення. В частотному діапазоні, що перебуває вище частоти поділу резонансів, гармонійні резонанси перекривають один одного і в цілому сприяють досить рівномірному звучанню, не створюючи негативного впливу на звучання. В частотному діапазоні, що перебуває нижче частоти поділу резонансів, різні частотні складові відтвореного сигналу звучать із різним рівнем гучності, тобто звучання починає підкорятися формі окремих резонансів [4,5]. Низькочастотні резонанси зумовлюють залишкове звучання, яке є причиною спотворення та зниження розбірливості мовної інформації, та є важливим демаскуючим фактором, оскільки такі акустичні хвилі мало поглинаються будівельними і звукоізоляційними матеріалами і здатні поширюватись на великі відстані. Крім того, гармонійні резонанси зумовлюють ще одну проблему – звучання у приміщенні стає позиційно залежним від джерела та приймача звуку. Статистична теорія не дає бажаних результатів для оцінки акустичних властивостей приміщень у цій практично

важливій ділянці частот [6]. З огляду на це дослідження закономірностей виникнення акустичних резонансів, породжених джерелом звуку, з урахуванням хвильової теорії поширення звуку в приміщеннях є актуальним завданням, вирішення якого дасть наукове підґрунтя розробникам та організаторам захищених приміщень

**Метою роботи** є дослідження резонансних властивостей захищених приміщень в діапазоні низьких частот та виявлення впливу місця розташування джерела та приймача звуку на розподіл в них акустичного поля.

### Постановка задачі та визначення моделі

Для виявлення закономірностей виникнення та поведінки низькочастотних акустичних резонансів необхідно визначити верхню граничну частоту, нижче якої резонансні частоти будуть розділеними; за допомогою системи фізико-технічного моделювання Comsol Multiphysics 3.5a [7,8] обчислити власні частоти приміщення та дослідити положення вузлів та пучностей отриманих мод у визначеному діапазоні частот; обчислити рівень звукового тиску, створеного джерелом звуку у певних точках приміщення.

Дослідження резонансних явищ проводились на моделі закритого приміщення розміром  $3 \times 4 \times 2,7 \text{ м}^3$ , в якому розташоване точкове джерело звуку. Джерело звуку породжує хвилі акустичного тиску  $p_a(t) = p_m \cos(j\omega t)$  в повітряному середовищі приміщення, поширення яких у просторі описується рівнянням Гельмгольца:

$$\nabla \left( -\frac{1}{\rho} \nabla p_a \right) - \frac{\omega^2 p_a}{\rho_0 c^2} = Q, \quad (1)$$

де  $p_a$  – тиск акустичної хвилі [Па],  $c$  – швидкість звуку в повітрі [м/с],  $\rho_0$  – густина повітря [кг/м<sup>3</sup>] і  $Q$  – монопольне джерело звуку [1/с<sup>2</sup>].

Припускаємо, що поверхні, що обрамлюють приміщення, відбивають хвилі без поглинання. Граничною умовою на поверхнях буде рівність нулю нормальної похідної тиску на поверхнях:

$$\frac{\partial p_a}{\partial n} = 0, \quad (2)$$

Якщо джерело звуку усунути з рівняння, то розв'язком такої системи рівнянь будуть часткові розв'язки, які визначають дискретний спектр резонансних частот і форму мод стоячих хвиль, залежних від геометрії приміщення.

Якщо звукові хвилі в приміщенні генеруються точковим джерелом звуку потужністю  $P$ , розташованому у точці  $R=R_0$ , то  $Q$  у рівнянні (1) визначається як

$$Q = 2 \sqrt{\frac{\pi P c}{\rho_0}} \delta^{(3)}(R - R_0), \quad (3)$$

де  $\delta^{(3)}(R)$  – тривимірна дельта-функція.

Розв'язком цієї системи рівнянь за таких самих граничних умов буде розподіл акустичного поля в приміщенні в досліджуваному діапазоні частот.

### Спектр власних частот та відповідні їм моди стоячих хвиль

Згідно з отриманими в роботі [4] аналітичними виразами, верхня гранична частота  $f_{гр}$  для змодельованого приміщення буде становити 277 Гц, і нижче цієї частоти буде міститись 107 резонансних частот.

За допомогою аналізу власних частот в системі фізико-технічного моделювання були обчислені резонансні частоти у окресленому частотному діапазоні (рис.1) і отриманий розподіл акустичного поля на кожній з них.

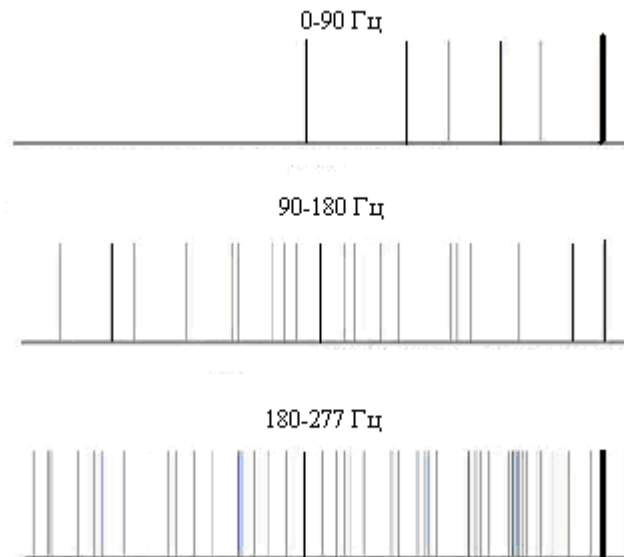


Рис. 1. Спектр власних частот приміщення нижче частоти поділу резонансів

Картина обчисленого акустичного поля на резонансних частотах дає змогу спостерігати форму мод, положення вузлів та пучностей у змодельованому приміщенні (рис.2).

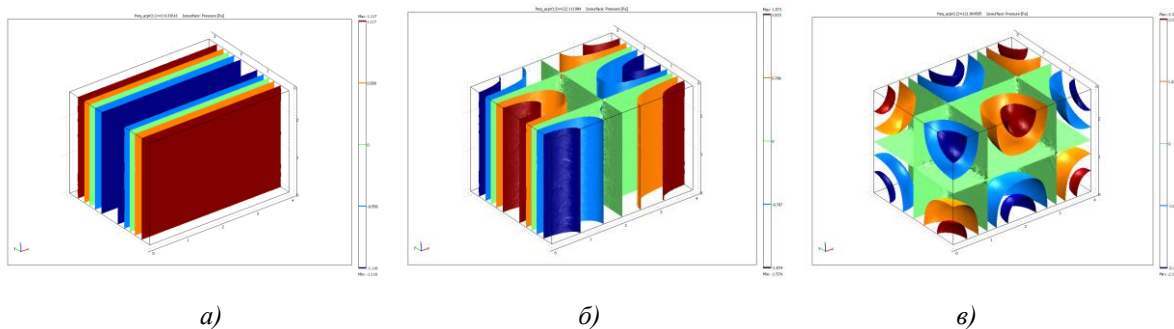


Рис. 2. Акустичне поле в приміщенні на деяких з резонансних частот: осьова мода 114,62 Гц (а), дотична мода 122,43 Гц (б), коса мода 121,38 Гц (в)

Результати моделювання співпадають з результатами, отриманими в [4] як щодо спектру власних частот, так і щодо мод, які їм відповідають. З розрахунків виявлено, що найнижча резонансна частота становить 42,97 Гц, тому для дослідження звукового поля в приміщенні, створеного точковим джерелом, був вибраний частотний діапазон  $\Delta f=40 - 130$  Гц., в якому буде міститись 15 резонансних частот, які відповідають різним модам. Вибраний частотний діапазон не ускладнює процесу обчислення, однак, є достатнім для отримання уявлення про сформоване акустичне поле і про роль місця розташування джерела та приймача звуку на створений рівень звукового тиску.

### Дослідження впливу розташування джерела звуку на формування акустичного поля в закритому приміщенні

Аналіз власних частот дає змогу виявити резонансні частоти приміщення незалежно від положення джерела звуку, однак, в реальних приміщеннях акустичне поле стає позиційно залежним від джерела звуку. За допомогою стаціонарного аналізу в частотній області в системі COMSOL Multiphysics 3.5a проведені дослідження, які розширюють уявлення про вплив приміщення на акустичне поле, породжене точковим джерелом звуку.

На рис.3 подано частотну залежність рівнів звукового тиску у двох різних точках розташування джерела звуку потужністю  $P=1$  Вт.

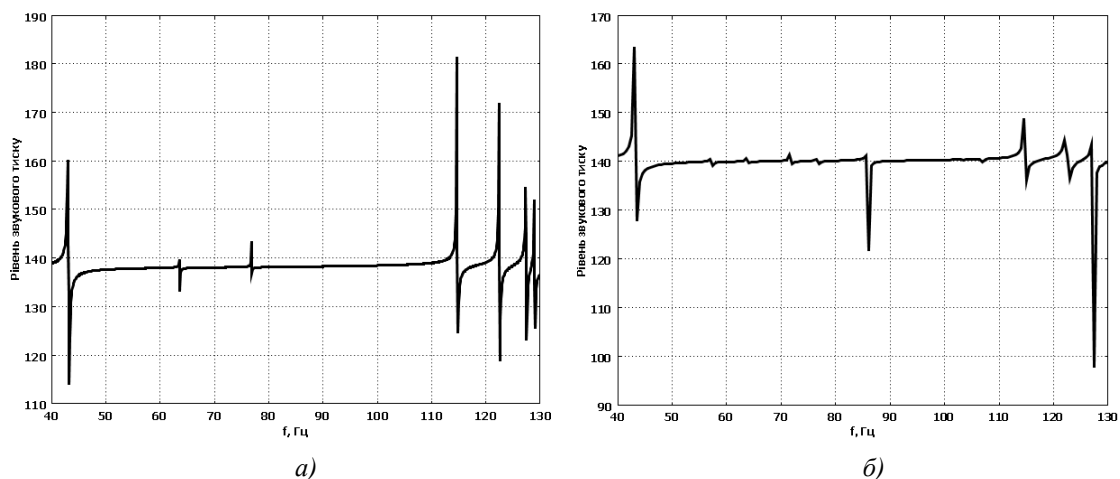


Рис. 3. Частотна залежність рівня звукового тиску у точках розташування джерела звуку:  $R_0=(1; 1,5; 1,5)$  (а) та  $R_0=(0,7; 1,3; 1,5)$  (б)

З рисунка 3,а видно, що за такого розташування джерела звуку у приміщенні збудиться не 15 стоячих хвиль, а лише 7, причому рівень тиску на кожній з мод буде різним. Порівняння отриманого результату з аналізом розподілу акустичного поля на різних власних частотах показало, що мода не збуджується, якщо джерело звуку розташоване у вузлі стоячої хвилі. Резонансні піки будуть мати великий рівень звукового тиску для мод, пучність яких буде співпадати з місцем розташування джерела (114,62 Гц), і меншатиме при віддаленні від нього (122,43; 42,97; 127,38; 128,97; 76,82; 63,67 Гц).

На рис.4, а,б показано розподіли звукового тиску по поверхні YZ, що проходить через джерело звуку для осьових стоячих хвиль, що поширюються вздовж осі Z та вздовж осі Y відповідно. У випадку моди частотою 63,67 Гц (рис.4,а) джерело звуку розташоване поблизу вузла стоячої хвилі, тому рівень тиску на цій частоті буде малим. Якщо джерело розташоване у пучності стоячої хвилі частотою 114,62 Гц (рис.4,б), то рівень тиску буде великим і набагато більшим, ніж створює джерело заданої потужності.

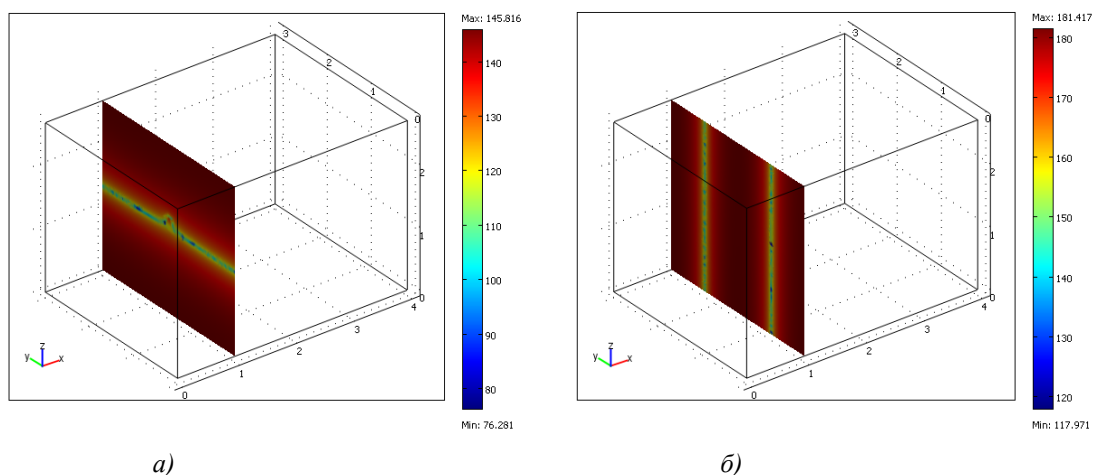


Рис. 4. . Розподіл рівня звукового тиску по поверхні YZ, що проходить через джерело звуку на частоті 63,67 Гц (а) та на частоті 114,62 Гц (б)

Зміна розташування джерела звуку приведе до збудження інших мод, причому кількість їх більшатиме з віддаленням від центру приміщення (рис.3,б). Дослідження показали, що у випадку нерезонансних частот і для мод, вузол яких припадає у точку джерела, максимальний рівень тиску буде визначатись потужністю джерела звуку.

Рівень створеного звукового тиску складним чином залежить від розташування приймача звуку (рис.5).

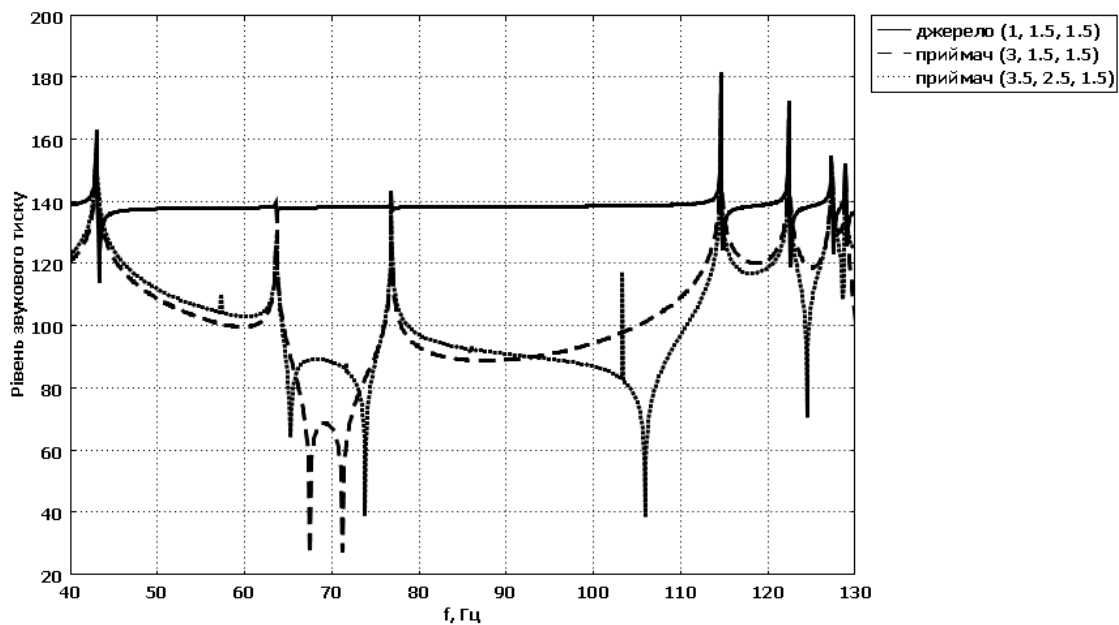


Рис. 5. Частотна залежність рівнів звукового тиску у точках джерела та приймача звуку

У точці приймання високий рівень тиску буде тільки на тих резонансних частотах, які обумовило джерело звуку. Якщо розташування приймача попадає у вузол моди, то збуджена джерелом звуку мода зникне. Таким чином, звучання мод визначається передовсім розташуванням джерела звуку, а від точки приймання залежить рівень тиску створених джерелом звуку мод.

## Висновки

Проведені дослідження дають змогу рекомендувати місця розташування учасників нарад в захищених приміщеннях. Для забезпечення кращої чутності та розбірливості мови потрібно уникати порожніх, необлаштованих кімнат, оскільки інтер'єр в приміщенні спотворює картину акустичного поля на резонансних частотах, а також рівновіддалених від стін місць. Це забезпечить рівномірніший частотний розподіл звукового тиску. У випадку телефонних розмов бажано не перебувати на одному місці, не виходити в необлаштовані кімнати, уникати перебування у центрі приміщення.

1. *Технические средства и методы защиты информации: Учебник для вузов/ Зайцев А.П., Шелупанов А.А., Мещеряков Р.В. и др.; под. ред. А.П. Зайцева, А.А. Шелупанова. – М.б ООО «Издательство Машиностроение», 2009 – 508 с.* 2. *Халяпин Д.Б. Защита информации. Вас подслушивают? Защищайтесь! – М. НОУ ШО «Баярд», 2004. – 432 с.* 3. *А.А. Торокин. Инженерно-техническая защита информации – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 960 с.* 4. *Морз Ф., Болт Р. Звуковые волны в помещениях./ Успехи физических наук. Т.XXXII, 1947, вып.2, с.185-238; вып.3, с.333–375; вып.4, с.417-463.* 5. *Newell P.R., Holland K.R., Hidley T., Reverberation is Unwanted Noise, Proceeding of Institute of Acoustics, Reproduced Sound 10 Conference, Vol.16, Part 4 pp.365-374 (1994).* 6. *Кеньо Г.В., Хома В.В. Акустична захищеність виділених приміщень у світлі статистичної та хвильової теорії. // Вісник НУ «Львівська політехніка» Автоматика, вимірювання та керування т.№695, с.22-29, 2011 р.* 7. *COMSOL 3.5 Руководство пользователя. (перевод с английского с редакторской правкой В.Е.Шмелева). <http://matlab.exponenta.ru/comsol/>* 8. *Acoustics Module User's Guide © COPYRIGHT 1994–2008 by COMSOL AB. Version: September 2008 COMSOL 3.5. - 272 p.*