

работы электронных схем: Пер. с нем. – М.: Изд-во ДМК Пресс, 2005. 336 с. 4. Фізико-технічне моделювання. Метод скінченних елементів / С. Д. Каїм. – Одеса: Негоціант, 2005.– 68 с. 5. COMSOL Multiphysics Modeling Guide, version 3.4, 2007, 474 p. 6. AC/DC Module – Model Library, ver. 3.4, COMSOL AB, 2007, 470 p. 7. Inductor in Amplifier Circuit // Solved with COMSOL Multiphysics 3.3.

УДК 621.395

Г. В. Кеньо, М. О. Ляшенко, Ю. Р. Любчик
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра захисту інформації

МОДЕЛЮВАННЯ АКУСТИЧНОГО КАНАЛУ ВИТОКУ ІНФОРМАЦІЇ ЧЕРЕЗ ВІДЧИНЕНЕ ВІКНО В ЗАХИЩЕНОМУ ПРИМІЩЕННІ

© Кеньо Г. В., Ляшенко М. О., Любчик Ю. Р., 2013

За допомогою системи фізико-технічного моделювання Comsol Multiphysics 3.5a змодельоване акустичне поле в системі “приміщення – вікно – відкритий простір”. Досліджено вплив відчиненого вікна на формування акустичного поля в приміщенні та вплив приміщення на поширення звукових хвиль через вікно у відкритий простір. Виявлено ймовірність перехоплення мовної інформації та показано залежність рівнів звукового тиску поза межами приміщення від розмірів досліджуваних об’єктів.

Ключові слова: акустичне поле, рівняння Гельмгольца, рівень звукового тиску, канал витоку акустичної інформації.

Using physical engineering simulation system Comsol Multiphysics 3.5a, an acoustic field in the system ‘closed room/window/open space’ has been simulated. The influence of the open window on the acoustic field formation in the closed room and the effect of the room on sound waves propagation through the window into the open space have been studied. Probability of language information interception and dependence of sound pressure levels outside the closed room on the size of the research objects have been established.

Key words: acoustic field, Helmholtz equation, eigenfrequencies, sound pressure levels, acoustic channels of information leakage.

Вступ

Цінність отримання конфіденційної мовної інформації спонукає до пошуку нових та удосконалення існуючих методів та засобів її перехоплення. Однак не втрачає своєї актуальності і перехоплення такої інформації повітряною хвилею із-за простоти та доступності його реалізації. Загрозу безпеці мовної інформації може нести підслуховування безпосереднє або за допомогою технічних засобів, яке здійснюється через двері, вікна та технологічні отвори у приміщенні [1]. Зважаючи на особливості розташування більшості офісів комерційних підприємств у житлових будинках, а також ймовірну втрату пильності співрозмовниками щодо заходів захисту мовлення, актуальним є завдання оцінювання ймовірності формування каналу витоку акустичної інформації через відчинене вікно. Інструментальний контроль є часто утруднений через важкодоступність до місць контролю, а існуючі розрахункові методи ґрунтуються на статистичній теорії поширення спрямованої звукової хвилі, що може бути причиною похибок у визначенні енергетичних показників. Тому метою роботи є створення фізичної моделі поширення звукових хвиль у системі “приміщення – вікно – відкритий простір” для виявлення ймовірності перехоплення мовної інформації.

Постановка задачі та опис моделі

Поширення звукових хвиль досліджували на двовимірних моделях відкритого простору, який подано півкругом радіусом 10 м з точковим джерелом звуку потужністю $P=2 \cdot 10^{-5}$ Вт/м, розташованим у точці $R_0 = (0;1,5)$ півкруга (рис. 1, а) та приміщення розміром 3×4 м² з вікном завдовжки 0,8 м, яке виходить у відкритий простір радіусом 10 м з коробки завширшки 0,2 м (рис. 1, б). Точкове джерело звуку такої самої потужності розташовували у точці $R_0 = (0,5;1,5)$ всередині приміщення. Моделювалося акустичне поле в середовищі фізико-технічного моделювання Comsol Multiphysics 3.5a [2].

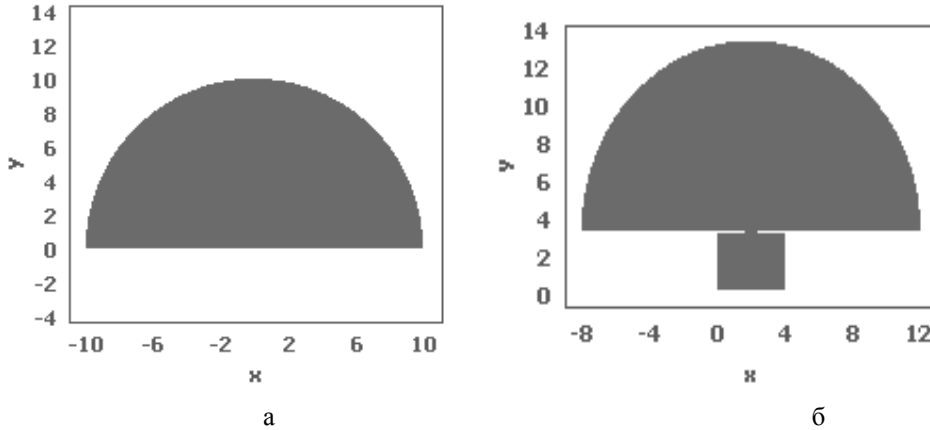


Рис. 1. Модель відкритого півпростору (а) та системи “приміщення – вікно – відкритий простір” (б)

Джерело звуку породжує хвилі акустичного тиску в повітряному середовищі приміщення, поширення яких описується рівнянням Гельмгольца:

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

де p_a – тиск акустичної хвилі, [Па]; $c=348$ м/с; $\rho_0=1,25$ кг/м³; Q – монопольне джерело звуку, $[1/c^2]$.

Якщо точкове джерело звуку потужністю P розташоване у точці $R=R_0$, то Q визначається як:

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

де $\delta^{(2)}$ – двовимірний дельта-функція.

Для моделювання поширення хвиль у відкритому просторі на всіх межах задавалась гранична умова випромінювання, яка дає змогу розбіжній циліндричній хвилі покинути ділянку моделювання з мінімальним поглинанням:

$$n \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} (\nabla p - q) \right) = \frac{1}{8r} \left(\frac{3 + 12ikr - 8k^2 r^2}{1 + ikr} \right) \frac{p_0 e^{-ikr} - p}{\rho_0} - i(k \cdot n) p_0 e^{-ikr} - \frac{(r \Delta_T p_0 e^{-ikr} + r \Delta_T p)}{2(1 + ikr) \rho_0},$$

де Δ_T – у цій точці на межі означає оператор Лапласа в дотичній площині, що проходить через цю точку; r – найкоротша відстань від джерела до точки.

При моделюванні приміщення припускаємо, що поверхні, що обрамлюють приміщення, відбивають хвилі без поглинання. Граничною умовою на поверхнях буде рівність нулю нормальної похідної тиску на поверхнях. Для моделювання поширення звукових хвиль через відкрите вікно у відкритий простір використовувалась умова безперервності середовищ. Цей стан виражає безперервність нормального прискорення і відповідає ситуації, коли внутрішня межа не має прямого впливу на поле акустичного тиску:

$$n \cdot \left[\left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p_a \right)_1 - \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p_a \right)_2 \right] = 0.$$

Поширення звукових хвиль досліджували в діапазоні частот $\Delta f=125-1000$ Гц.

Дослідження поширення звуку у відкритому просторі

У відкритому просторі точкове джерело звуку створює розбіжну хвилю, яка поширюється у всіх напрямках від джерела звуку. На різних частотах це має вигляд концентричних кіл з центром у точці джерела звуку (рис. 2, а). Якщо нижня межа півкруга буде відбивальною (наприклад, земна поверхня, стіна будинку), то внаслідок відбивання і накладання хвиль спостерігатиметься інтерференційна картина: акустичне поле не буде однорідним, у деяких місцях амплітуда тиску буде зменшуватись, а в деяких – зростатиме.

На рис. 2, б показано залежність від відстані рівнів звукового тиску, створеного точковим джерелом звуку, в діапазоні частот 125÷1000 Гц.

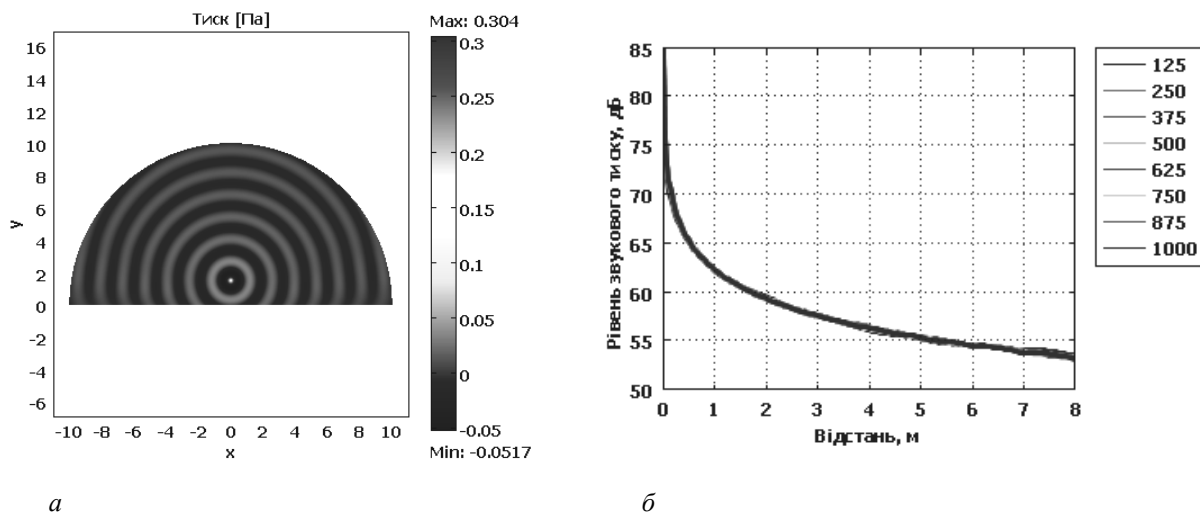


Рис. 2. Поле звукового тиску у відкритому просторі на частоті 250 Гц (а); та просторова залежність рівнів звукового тиску в досліджуваному діапазоні частот (б)

З рисунка видно, що рівень звукового тиску зменшується обернено пропорційно до відстані від джерела звуку і не залежить від частоти. Отримані результати моделювання підтверджують відому теорію поширення звукових хвиль у відкритому просторі [3].

Дослідження поширення звуку з приміщення у відкритий простір

Поширення хвиль акустичного тиску з приміщення через вікно у відкритий простір досліджували шляхом порівняння картини звукового поля у відкритому просторі, закритому приміщенні [4] та в системі “приміщення – вікно – відкритий простір”.

На рис. 3 подано звукове поле у закритому приміщенні на резонансній частоті 143 Гц та в системі “приміщення – вікно – відкритий простір” на частотах 143 Гц та 500 Гц. На рис. 3.1, а симетричне поле акустичного тиску на власній частоті приміщення формується дотичною стоячою хвилею, яка зникає при відчиненому вікні (рис.3, б).

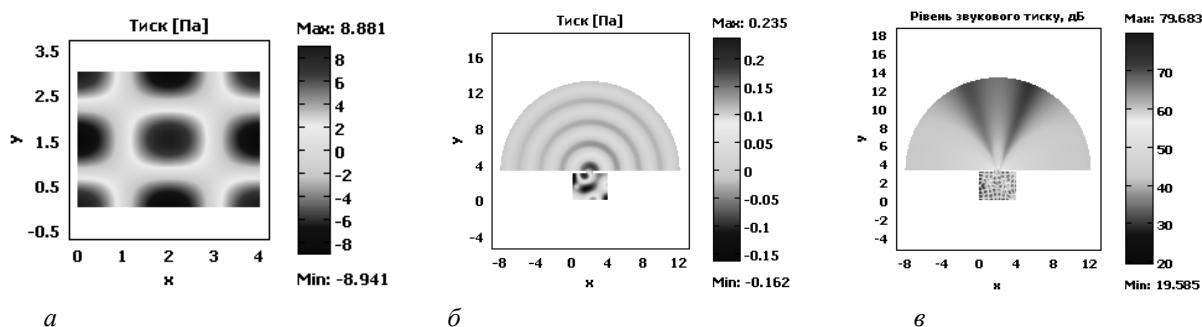


Рис. 3. Поле звукового тиску у закритому приміщенні на частоті 143 Гц (а), в системі “приміщення – вікно – відкритий простір” (а) та інтерференційна картина поля рівня звукового тиску в такій системі на частоті 500 Гц (в)

З рис. 3, б видно, що хвилі від точкового джерела звуку поширюються у декілька етапів. На першому етапі утворюється складна картина звукового поля в приміщенні внаслідок багаторазового відбивання від твердих його поверхонь. Поблизу віконної коробки формується ділянка високого акустичного тиску, яка стає джерелом поширення хвиль у відкритому просторі, причому не утворюється інтерференційна картина внаслідок відбивання хвиль від зовнішньої стіни приміщення. Дослідження звукового поля біля вікна показали, що джерелом звуку у відкритому просторі на низьких частотах є точка у межах віконної коробки, а далі хвилі поширюються подібно до поширення хвиль у відкритому просторі, тобто формується розбіжна сферична хвиля. На вищих частотах біля вікна в приміщенні формується більша кількість зон високого та низького тиску, відповідно, декілька вторинних джерела хвиль, які утворюють інтерференційну картину поля рівня звукового тиску (рис. 3, в).

Моделювання показало, що поширення хвиль з приміщення відрізняється від поширення безпосередньо у відкритому просторі: зберігається гармонічний характер поширення, але приміщення змінює амплітуду тиску та фазу акустичної хвилі.

Для виявлення впливу відкритого вікна на акустичне поле в приміщенні досліджувався рівень тиску у точці джерела звуку у приміщенні з закритим та відкритим вікнами (рис. 4).

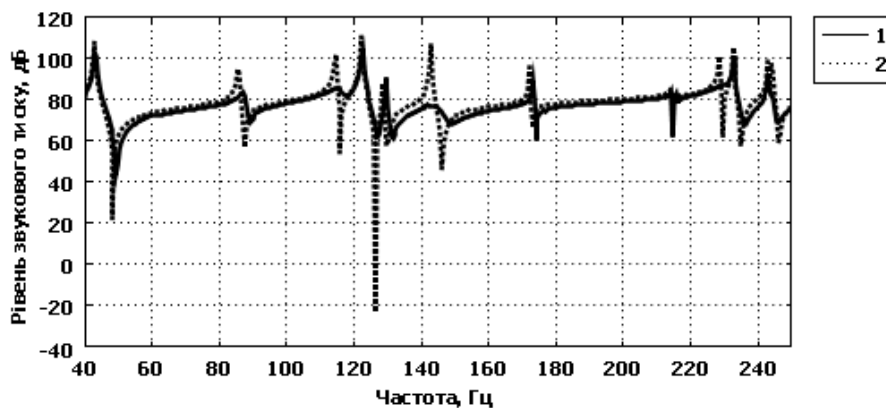


Рис. 4. Спектр рівнів тиску у точці джерела звуку у приміщенні з відкритим вікном (1) та у закритому приміщенні (2)

З рисунка видно, що на нерезонансних частотах у приміщенні з вікном рівень тиску рівномірно знижується у всьому досліджуваному частотному діапазоні. На резонансних частотах можна виділити три випадки впливу відкритого вікна на рівень звукового тиску. На одних резонансних частотах рівень тиску знизився мало, залишилися чітко виражені резонансні піки, на інших – значно знизився, резонансні піки згладились, а деякі резонанси взагалі зникли. Так, вікно поглинуло енергію звукових хвиль у всьому частотному діапазоні, а на резонансних частотах по-різному: на деяких особливо відчутно, а на інших – мало відчутно. Порівняння акустичного поля у закритому приміщенні та у приміщенні з відкритим вікном на всіх резонансних частотах показало, що на резонансних частотах, які залишилися у приміщенні при відкритому вікні, залишилися і стоячі хвилі. На всіх цих частотах проти відкритого вікна розташований вузол стоячої хвилі. З порівняння картини звукового поля на частотах, які зазнали значного зниження рівня звукового тиску при відкритому вікні, можна побачити, що це були або стоячі хвилі з пучностями навпроти вікна, або осьова хвиля, що утворюється поверхнями, одна з яких має вікно.

Виявлення ймовірності перехоплення мовної інформації з приміщення

Для розуміння звучання звуку поза межами приміщення розраховувались рівні звукового тиску у ймовірних точках перехоплення інформації, які розташовані на відстані 3 см справа та зліва від вікна та на відстані 0,5 м і 8 м від центру вікна. Дослідження показали частотну залежність рівнів звукового тиску у всіх досліджуваних точках, зумовлену впливом приміщення.

Для оцінювання ймовірності перехоплення мовної інформації розраховувались усереднені значення рівня звукового тиску у досліджуваних точках (рис. 5).

З порівняння усереднених рівнів звукового тиску у точках приймання і рівнів шумів можна зробити висновок, що звук, породжений джерелом середньої гучності (~70 дБ), буде добре чутним за умови тихої вулиці (~30 дБ) у всіх досліджуваних точках, причому справа і зліва від вікна інтенсивність звуку буде майже однаковою, незважаючи на несиметричність положення щодо джерела звуку.

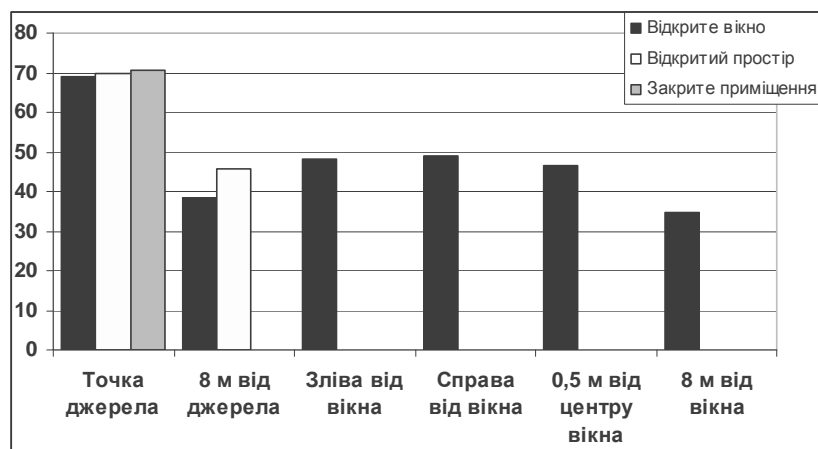


Рис. 5. Усереднені рівні звукового тиску у точці джерела та приймачів звуку

Якщо вікно з приміщення виходить на вулицю з шумами середньої інтенсивності (~55 дБ), то навіть поблизу вікна інформацію не оброблену спеціальними засобами перехопити не можливо.

Дослідження показали, що у випадку розташування джерела звуку в приміщенні, рівень акустичного тиску у рівновіддалених точках є нижчим, порівняно з відкритим простором.

Для виявлення впливу розмірів приміщення та вікна на інтенсивність звуку у точках приймання моделювали акустичне поле системи з різними геометричними розмірами об'єктів. Було виявлено, що розміри приміщення мало впливають на рівень звукового тиску поза його межами, а зі зменшенням розмірів вікна усереднений рівень звукового тиску в досліджуваних точках знижуватиметься.

Висновки

Дослідження акустичного поля в системі “приміщення – вікно – відкритий простір”, породженого джерелом звуку в приміщенні, показали, що відчинене вікно поглинає акустичну енергію в приміщенні. Приміщення, своєю чергою, впливає на поширення звукових хвиль через вікно, зменшуючи рівень акустичного тиску порівняно з відкритим простором. Отже, розрахунки, згідно зі статистичною теорією поширення звуку, дають завищені енергетичні показники. Однак при відчиненому вікні в приміщенні існує велика загроза перехоплення мовної інформації, особливо за низького рівня шумів поза його межами. Ймовірність перехоплення інформації знижується зі зменшенням розмірів вікна і мало залежить від розмірів приміщення.

Отримані у процесі моделювання результати можуть бути корисними при оцінюванні загроз витоку акустичної інформації з виділених приміщень як працівникам, що займаються технічним захистом інформації, так і особам, зацікавленим у збереженні її конфіденційності, для кращого розуміння причин формування акустичних каналів витоку інформації та необхідності відповідних заходів, що запобігають її перехопленню.

1. Торокин А. А. *Инженерно-техническая защита информации* – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 960 с. 2. *Acoustics Module User's Guide* © COPYRIGHT 1994–2008 by COMSOL AB. Version: September 2008 COMSOL 3.5. – 272 p. 3. Дж. В. Стрэтт (Лорд Рэлей). *Теория звука*. пер. с англ. в 2-х томах. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1940. – Т. 1. – 500 с., т. 2 – 476 с. 4. Кеньо Г. В., Ляшенко М. О. *Дослідження резонансних явищ у захищених приміщеннях* // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”*. – 2012. – № 741. – С. 113–117.