

TECHNICAL SCIENCES

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДА КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДО ПРОГНОЗУВАННЯ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОВИХ ПОЛІВ В ПОВІТРІ

Заєць В.П.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кандидат технічних наук, доцент

APPLICATION OF THE FINITE ELEMENT METHOD TO FORECASTING THE ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF SOUND FIELDS IN AIR

Zaets V.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» PhD, Associate Professor

АНОТАЦІЯ

Досліджено можливість застосування методу кінцевих елементів до моделювання акустичних полів та кількісно визначено співпадіння результатів моделювання з результатами натурних вимірювань. Метод кінцевих елементів один із двох найбільш поширених числових методів комп'ютерного моделювання. В даній статті на конкретних прикладах показано результати моделювання різних акустичних характеристик. Серед них визначення власних частот коливання системи з розподіленими параметрами та візуалізація власних форм коливань.

Крім того було показано можливість застосування даного методу до визначення акустичних характеристики приміщення, що раніше визначалися за допомогою статистичної чи променевої теорії.

Також показано можливість застосування даного методу до визначення акустичних полів в напівнескінчених середовищах з достатньо складною геометрією, яку майже неможливо описати аналітичними залежностями.

Крім того результати моделювання було порівняно з результатами натурних випробувань. Було показано межі подібності результатів, та вказано на причини розбіжності.

Результати таких досліджень дозволять розширити межі застосування методу кінцевих елементів та дають можливість оцінити точність комп'ютерного моделювання за допомогою цього методу.

ABSTRACT

The possibility of applying the finite element method to the modeling of acoustic fields is investigated and the coincidence of the simulation results with the results of field measurements is quantified. The finite element method is one of the two most common numerical methods of computer simulation. This article shows the results of modeling different acoustic characteristics on specific examples. Among them are the determination of the natural frequencies of the system with distributed parameters and the visualization of natural forms of oscillations.

In addition, the possibility of applying this method to determine the acoustic characteristics of the room, which were previously determined by statistical or radiation theory, was shown.

The possibility of applying this method to the determination of acoustic fields in semi-infinite media with a rather complex geometry, which is almost impossible to describe by analytical dependences, is also shown.

In addition, the simulation results were compared with the results of field tests. The limits of similarity of the results were shown, and the reasons for the discrepancy were pointed out.

The results of such studies will expand the scope of the finite element method and make it possible to assess the accuracy of computer simulations using this method.

Ключові слова: метод кінцевих елементів, власні частоти, моди коливань, час реверберації, шумозахисний екран, рівень звукового тиску.

Keywords: finite element method, natural frequencies, oscillation modes, reverberation time, noise barrier, sound pressure level.

1. Вступ

Метод кінцевих елементів поруч із методом граничних областей є одним із двох найпоширеніших числових методів, що застосовуються в акустиці. Використання цього методу дозволяє оцінити звукове поле в відносно невеликому об'ємі середовища. Це пов'язано із самою суттю метода, яка полягає в тому, що всю область простору необхідно поділити на дрібні частини, для яких знаходиться розв'язок диференційного рівняння. Чим

більший простір, тим більша кількість рівнянь в системі. Що стосується звукових коливань, то є ще один фактор, який впливає на складність розрахунків, а саме, те що для отримання розв'язку який збігається необхідно щоб найбільший розмір кінцевого елемента був би меншим за довжину хвилі [1 – 3].

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Однак незважаючи на вказані обмеження за допомогою цього методу досліджували коефіцієнта відбиття кількох акустичних шарів шумозахисних екранів [4]. Дані дослідження показали, що частотна характеристика звукопоглинання касетою шумозахисного екрану досить добре погоджується з результатами натурних експериментів. Використання числового методу дозволило оцінити вплив перфорації касети екрану на коефіцієнт звукопоглинання особливо в частотній області вище 2000 Гц.

В роботі [5] було досліджені механічні властивості композитних шумозахисних екранів із полімерних матеріалів.

Також метод кінцевих елементів застосовувався для оптимізації топології шумозахисних екранів [6 – 8]. І хоча даний підхід не знайшов широкого застосування до проектування шумозахисних екранів, однак від дозволив визначити напрямки майбутніх досліджень з покращення акустичних властивостей екранів.

В роботах [9, 10] за допомогою даного методу було проведене моделювання звукового поля довкола шумозахисних екранів, що захищають від шуму транспортних потоків.

Однак основним недоліком застосування даного методу є невизначенність похибки результатів розрахунків.

Таким чином, задача визначення збігу результатів акустичного моделювання методом кінцевих елементів із результатами експериментальних досліджень є вкрай важливою та актуальною. Порівняння результатів обчислень дозволить пере-

свідчитися в можливості застосування даного методу для моделювання не тільки звукових полів з визначення рівнів звукового тиску, а й інших акустичних характеристик, таких як частотна характеристика часу реверберації в приміщенні тощо.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – оцінити співставність результатів моделювання звукового поля в найбільш поширених ситуаціях та результатів інструментальних досліджень.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

- Побудувати різні комп'ютерні моделі та розрахувати методом кінцевих елементів акустичні характеристики звукового поля.

- Провести інструментальні вимірювання акустичних характеристик та порівняти результати з результатами моделювання.

4. Резонатор Гельмгольца

Резонатор Гельмгольца одна з найбільш поширених форм в акустиці, розрахунки і моделювання якого проводилося чи не найчастіше. Однак якщо зробити модель резонатора з довгим горлом, то виявляється що в такого резонатора є не одна резонансна частота, а безліч.

4.1. Акустичне моделювання

Детально про акустичні дослідження резонаторів Гельмгольца з подовженим горлом описано у власних дослідженнях [11], тут лише зупинимося на кінцевих результатах.

Акустичне поле в рівнях звукового тиску, що було отримане в результаті моделювання наведено на рис. 1

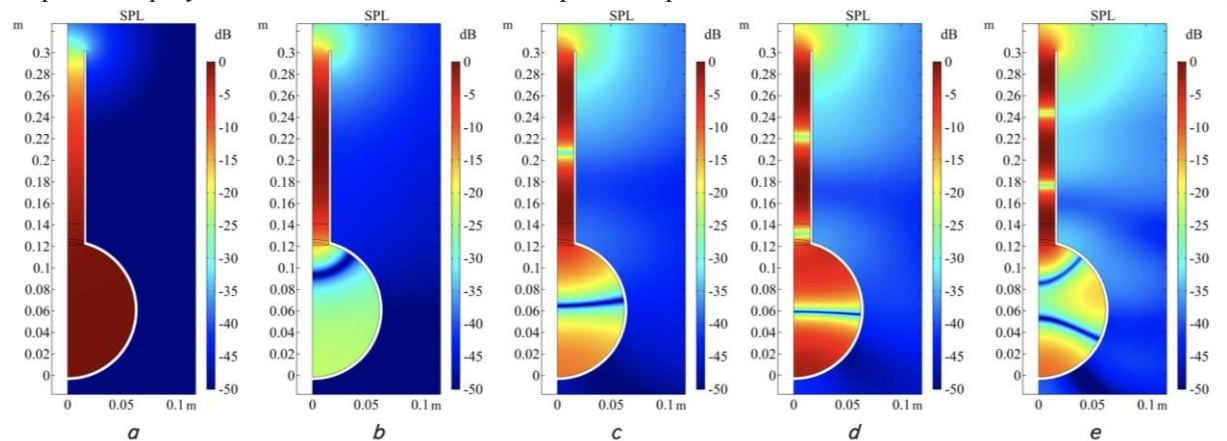


Рисунок 1 – Перші 5 мод коливань повітря в резонаторі Гельмгольца з подовженим горлом: а) – $f = 99$ Гц; б) – $f = 893$ Гц; в) – $f = 1681$ Гц; г) – $f = 1947$ Гц; е) – $f = 2625$ Гц.

Як видно з рис. 1 за допомогою метода кінцевих елементів вдалося не лише визначити частоти власних коливань резонатора, а й наглядно навести звукове поле і визначити власні моди коливань повітря в резонаторі.

4.2. Експериментальні дослідження

Експериментальні дослідження які були проведені в лабораторних умовах стосувалися визначення власної частоти коливань. Також визначалися відносні рівні звукового тиску в 13 точках, що були розміщені на осі резонатора (рис. 2).

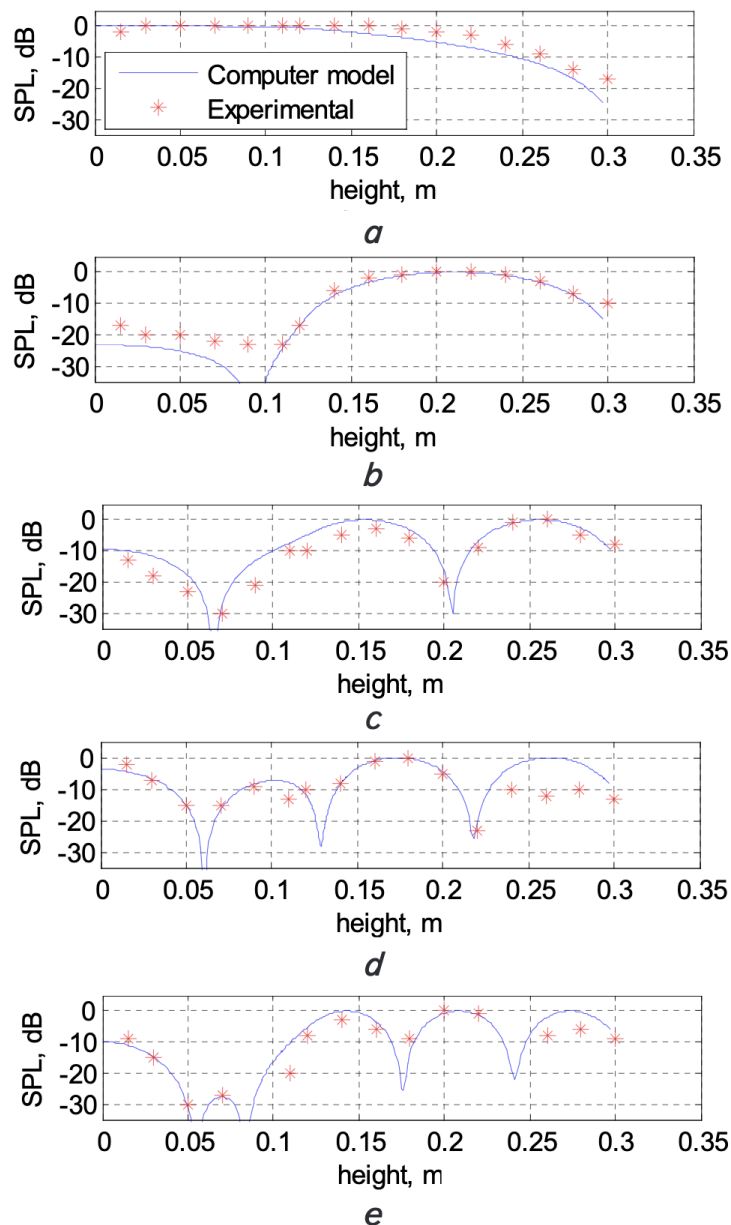


Рисунок 2 – Порівняння результатів експерименту та моделювання (частоти визначені комп'ютерним моделюванням наведені в дужках):

a) – $f = 99(99)$ Гц; b) – $f = 893(892)$ Гц; c) – $f = 1681(1693)$ Гц;
d) – $f = 1947(1947)$ Гц; e) – $f = 2625(2644)$ Гц.

Дане дослідження показує, що застосування методу кінцевих елементів для системи з розподіленими параметрами є досить надійним інструментом прогнозування.

Метод кінцевих елементів дозволяє не тільки оцінити рівні звукового тиску, але й знаходити власні частоти коливань системи, а також описувати моди коливань.

Деякі розбіжності результатів вимірювань з результатами моделювання особливо в горлі резонатора ($h > 0,12$ м) пояснюється тим, що вимірювальний мікрофон мав власний об'єм, який міг впливати на об'єм повітря в трубці.

5. Концертна зала

Акустичні характеристики концертних залів зазвичай визначають за допомогою статистичної або променевої теорії поширення звуку. Однак метод кінцевих елементів дозволяє поєднати їх із хвильовою теорією поширення звуку, що й було зроблено на прикладі концертного залу.

Кіно-концертна зала «Україна» розміщується в окремій будівлі і має складну геометрію та відноситься до Пам'ятника архітектури. Приміщення зали можна відносити до залів амфітеатрального типу із ввігнутою стелею. План зали подано на рис. 3, а поздовжній розріз на рис. 4.

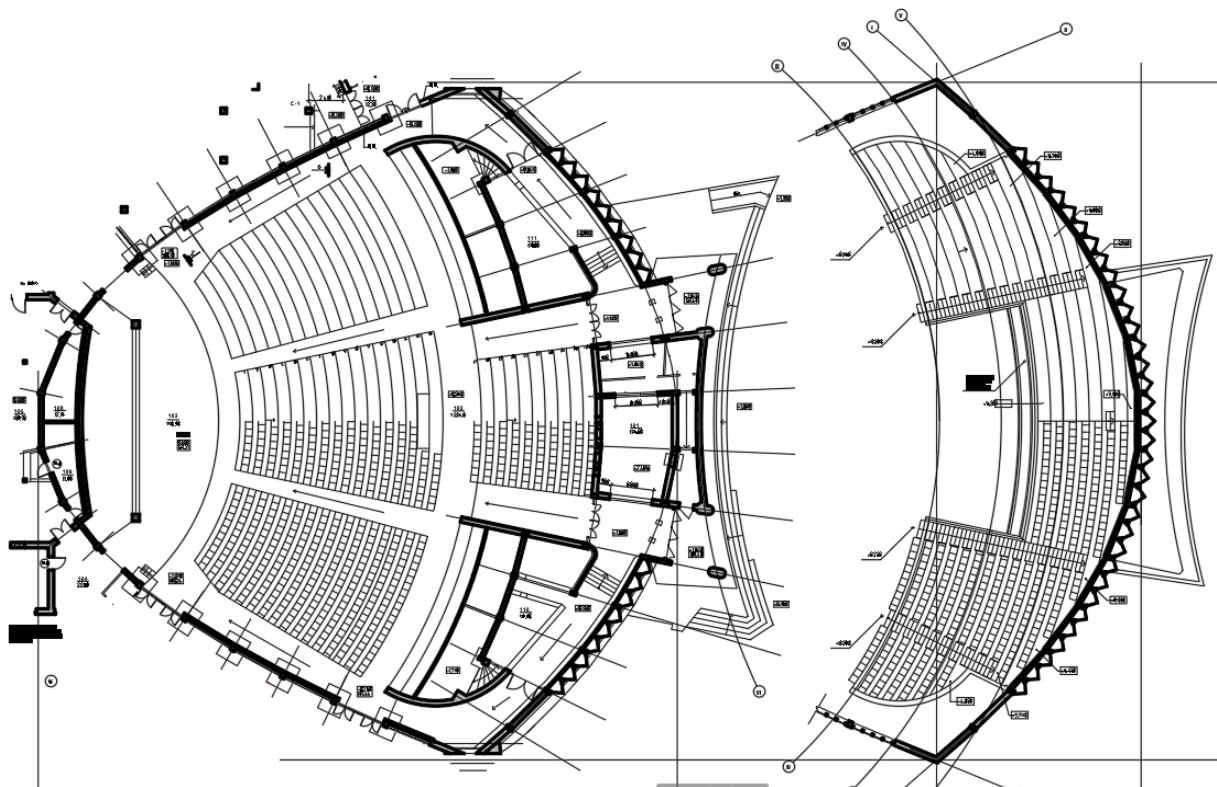


Рисунок 3 – План залу ККЗ «Україна»

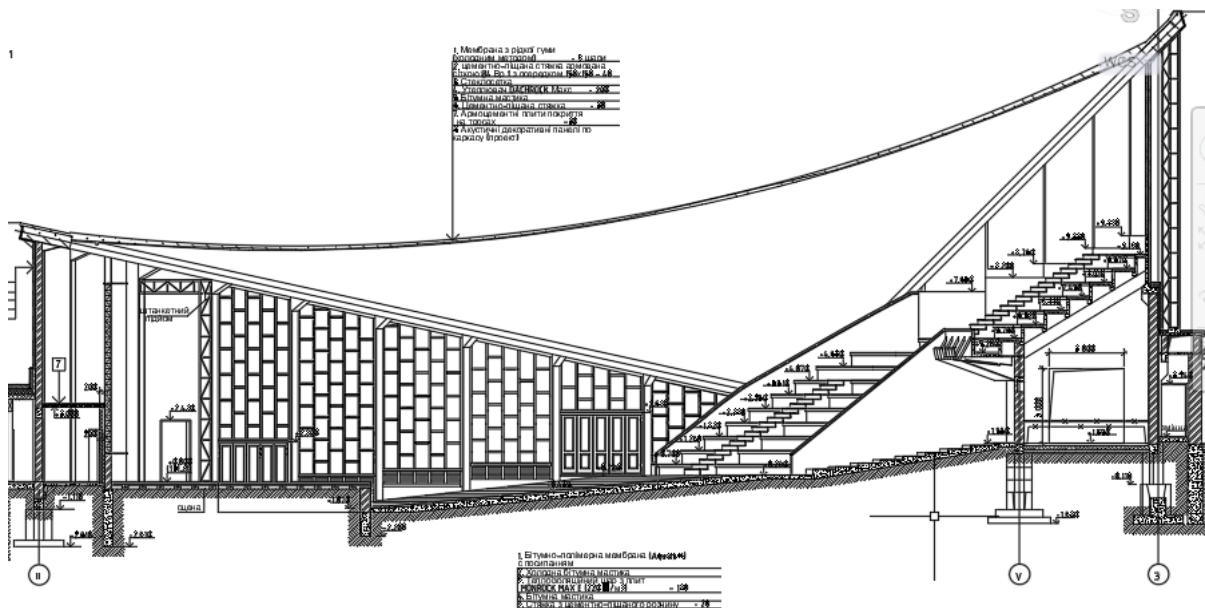


Рисунок 4 – Поздовжній розріз ККЗ «Україна» м. Харків

Площа підлоги партеру становить 750 m^2 , а площа антресолі – 470 m^2 . На даній площі було розміщено 1780 напівжорстких крісел для глядачів.

Площа стін зали становить – 693 m^2 ;

Площа стелі – 1486 m^2 .

Загальна площа огорожень залу з урахуванням огорожень сцени близько 4 тис. m^2 .

5.1. Акустичне моделювання

Комп'ютерне моделювання зали включало в себе задання геометричної моделі приміщення зали

за даними креслень, а також вказання ревербераційних коефіцієнтів звукопоглинання огорожень, що обиралися з технічних даних виробників матеріалів.

На рис. 5 показана геометрія комп'ютерної моделі зали.

За результатами розрахунків методом часткових елементів було розраховані імпульсні характеристики зали в різних місцях, що дало змогу врахувати середній час реверберації зали (рис. 6).

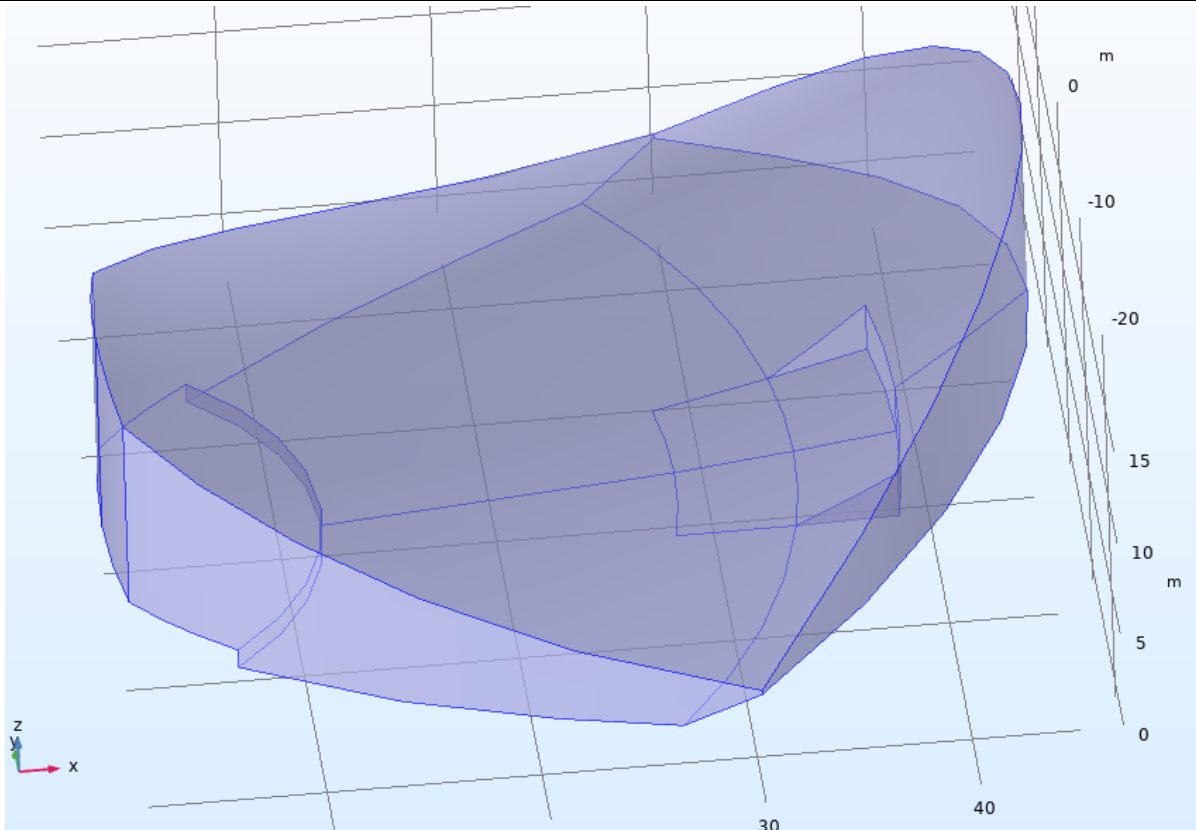


Рисунок 5 – Комп'ютерна модель глядацького залу ККЗ «Україна» м. Харків

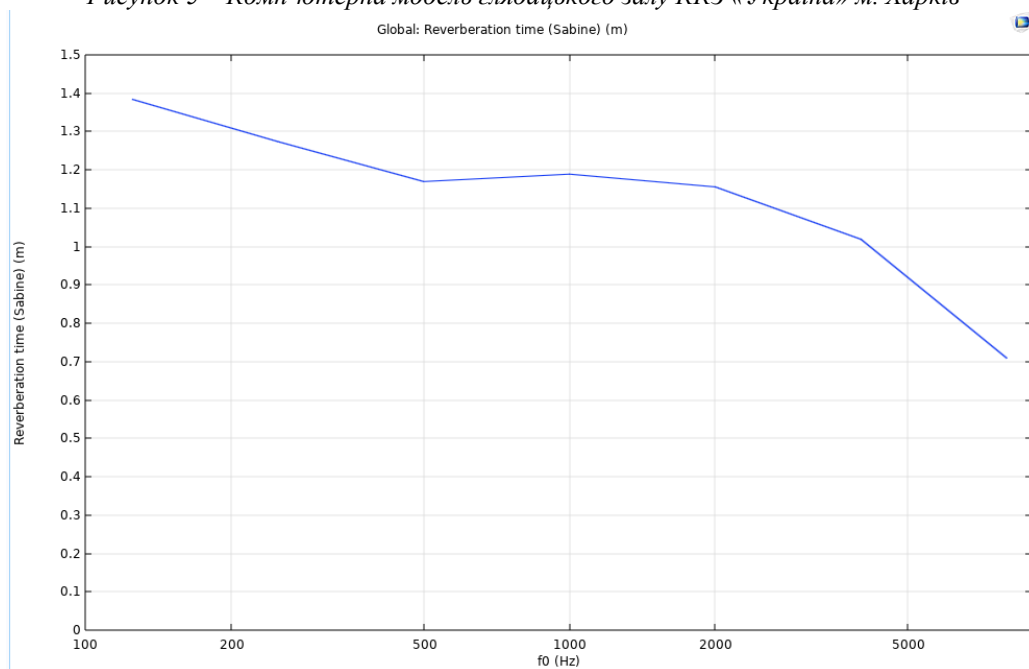


Рисунок 6 – Частотна характеристика часу реверберації зали

5.2. Експериментальні дослідження

Після проведення реконструкції зали та внутрішнього оздоблення були проведені натурні вимірювання часу реверберації в приміщенні зали

(рис. 7). Результати вимірювань показують, що вимірний час реверберації в середньому 0,2 с нижчий за розрахований методом кінцевих елементів.

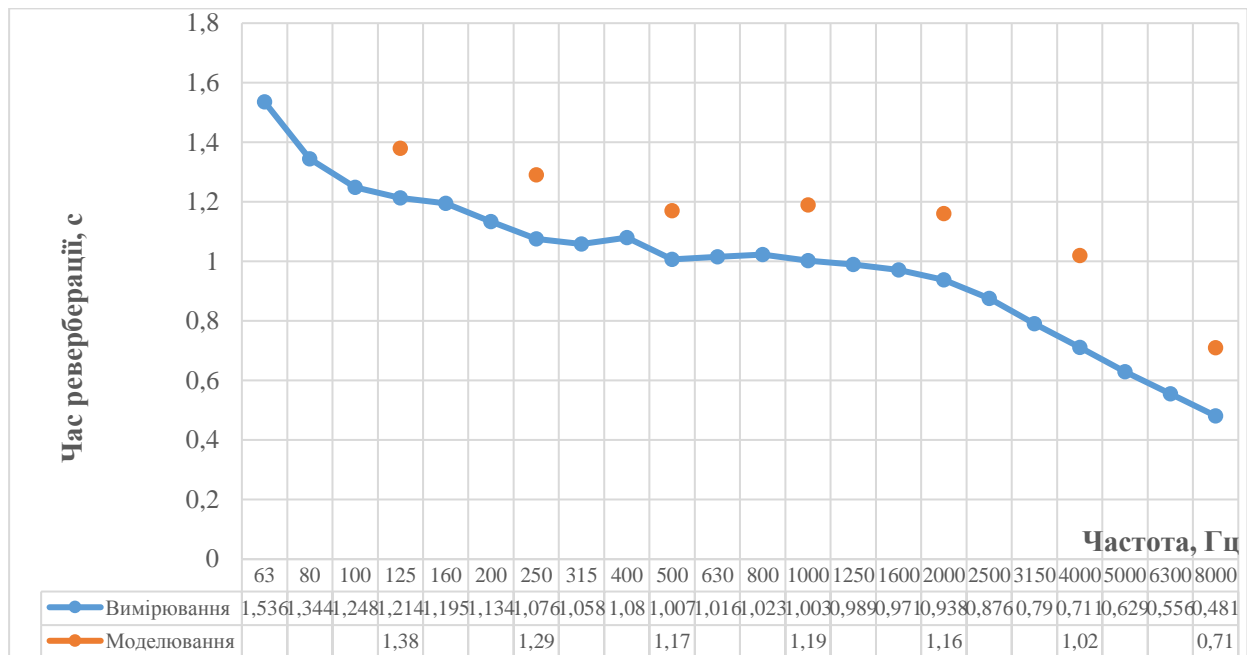


Рисунок 7 – Порівняння результатів розрахунку часу реверберації та результатів натурних вимірювань в приміщенні зали

Можливою причиною такого достатньо великого відхилення на всіх частотах стало те, що оздоблення стелі зали відбувалося не в притул до конструкції стелі, а з відносом 0,3-0,5 м. Така відстань між оздоблюваним матеріалом та конструкцією стелі призвела до збільшення звукопоглинання, що в свою чергу призвело до зниження часу реверберації в приміщенні на всіх частотах.

6. Транспортна магістраль захищена шумозахисним екраном

Метод кінцевих елементів може бути застосованим не лише до малих чи замкнених об’ємів простору, а й для необмежених просторів таких як простір довкола автомобільної магістралі.

6.1. Акустичне моделювання

Транспортний потік зазвичай моделюється лінійним джерелом звуку [12, 13]. Для більш точного моделювання бажано кожен смугу руху транспорту моделювати, як окреме джерело звуку.

Вихідними параметрами для моделювання звукового поля довкола транспортної магістралі з шумозахисним екраном є шумова характеристика транспортного потоку, геометричні розміри екрану, його акустичні характеристики та взаємне розташування екрану і джерела шуму.

Було проведено моделювання звукового поля від потоку автомобільного транспорту, що рухався автошляхом Е-95 в Київській області (рис. 8).

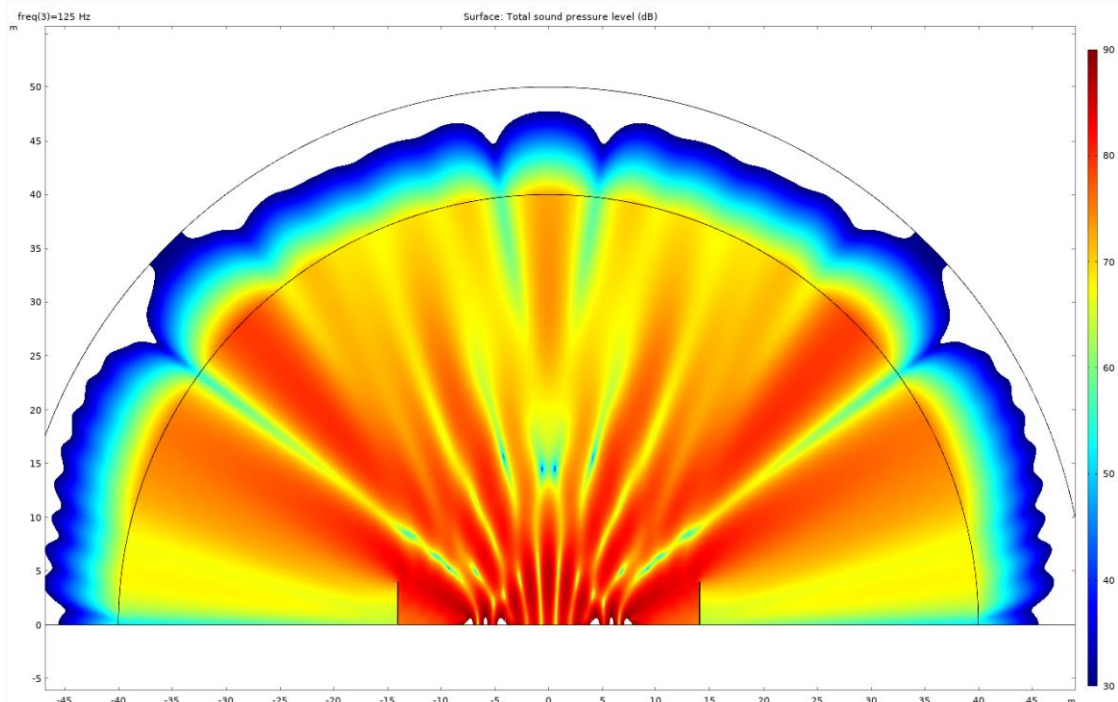


Рисунок 8 – Розрахункове звукове поле

Поверхня екранів, що обернена в бік джерел шуму та поверхня землі за екраном моделювалося імпедасною поверхнею з акустичним імпедансом, що відповідав імпедансу повітря. Такий підхід дозволяв враховувати звукопоглинальні властивості як екрану, так і поверхні землі, що вкрита травою.

Зовнішня межа області моделювання обиралася як ідеально поглинальний шар (Perfectly Matched Layer), що дозволяє виконувати умову Зоммерфельда. Джерела звуку моделювалися чотирма монополями, які розташовані на висоті 0,5 м від акустично жорсткої поверхні, що моделювала проїжджу частину автошляху.

6.2. Експериментальні дослідження

Дослідження зниження рівнів шумозахисними екранами проводилося в натурних умовах, на вже побудованих шумозахисних екранах вздовж ав-

тошляху Е-95 Київ – Одеса. Було обрано 3 населених пункти (с. Глеваха, с. Митниця, с. Ксаверівка) в межах яких споруджено шумозахисні звукопоглинальні екрани висотою 4 м.

Вимірювання рівнів звуку проводилося у двох точках на відстані 10 м від краю проїжджої частини. Одна точка знаходилася за екраном на відстані не менше 50 м від краю екрану, інша – на частині дороги без екрану та інших перешкод. В усіх трьох випадках екрану були розташовані по обидві сторони від дороги. Рельєф місцевості по можливості обирався максимально однаковим.

На рис. 9 наведено частотні характеристики зниження шуму екранами отриманими шляхом натурних вимірювань та обчислення за допомогою методу кінцевих елементів.

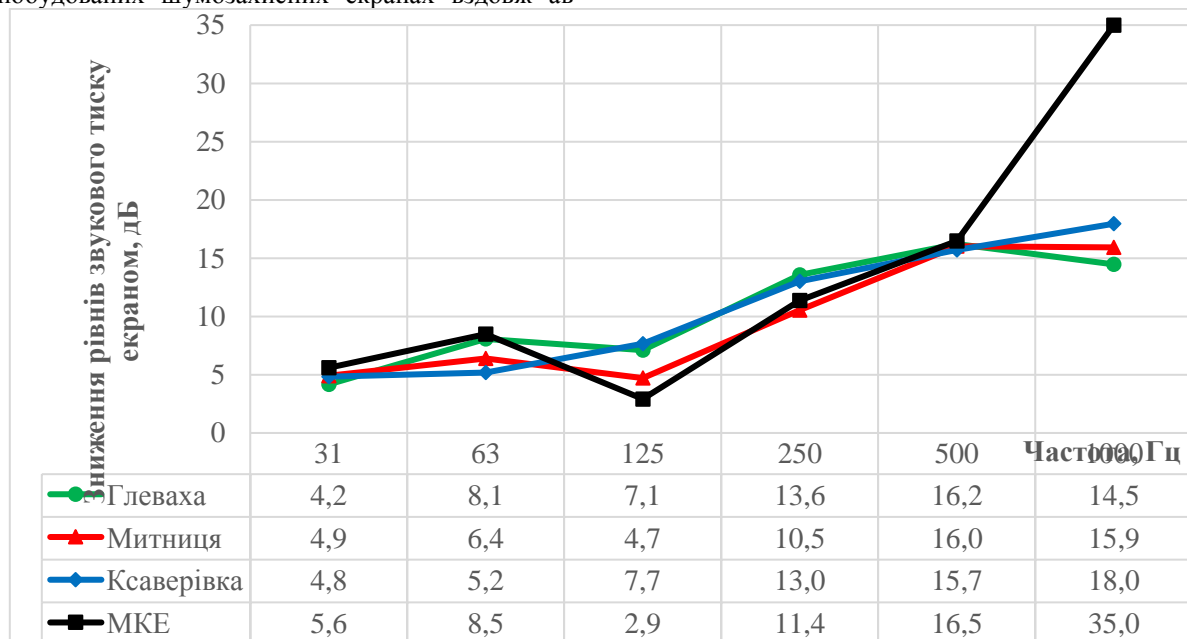


Рисунок 9 – Частотна характеристики ефективності шумозахисних екранів

Як бачимо з результатів вимірювання та розрахунку методом кінцевих елементів (МКЕ), в межах 31 – 500 Гц результати вимірювань та розрахунку співставні.

На частоті 1000 Гц і вище збіжність результатів незадовільна. Це може бути пов'язане як з тим, що на високих частотах збіжність результату розрахунку методом кінцевих елементів могла бути незадовільною. З іншого боку наявність щілин між елементами екрану на високих частотах могли призвести до зменшення його ефективності за рахунок проходження звукової хвилі крізь щілини.

7. Висновки

З наведених прикладів можна побачити, що застосування методу кінцевих елементів дозволяє швидко проводити акустичні розрахунки та визначати необхідні параметри різних об'єктів.

Порівняння результатів моделювання та експериментальних досліджень підтверджує достатню високу точність розрахунків.

Так з отриманих результатів відносна похибка визначення власних частот коливальних резонаторів становила не більше 5%.

Похибка у визначенні ефективності шумозахисних екранів не більше ± 3 дБ в діапазоні частот до 500 Гц.

Аналіз деяких розбіжностей в результатах розрахунків та натурних вимірювань має об'єктивні причини, що були спричинені невідповідністю закладених параметрів моделі та реальної ситуації які були під час вимірювань.

Можна стверджувати, що точність результатів розрахунків методом кінцевих елементів напряму залежить від точності вихідних параметрів моделі.

Література

- Ihlenburg, F. (Ed.). (1998). *Finite element analysis of acoustic scattering*. New York, NY: Springer New York.
- Grahn, P., & Jensen, M. H. (2019). Optimizing noise barriers with comsol multiphysics.
- Kulkina, V., & Komkin, A. (2020). Study of acoustic characteristics of noise barriers. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 320, p. 00030). EDP Sciences.
- Reiter, P., Wehr, R., & Ziegelwanger, H. (2017). Simulation and measurement of noise barrier

sound-reflection properties. *Applied Acoustics*, 123, 133-142.

5. Dae, B., & El Naggat, H. (2017). 3D finite element analysis of composite noise barrier constructed of polyurethane products. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11(1), 100-110.

6. Dühring, M. B., Jensen, J. S., & Sigmund, O. (2008). Acoustic design by topology optimization. *Journal of sound and vibration*, 317(3-5), 557-575.

7. Kook, J., Koo, K., Hyun, J., Jensen, J. S., & Wang, S. (2012). Acoustical topology optimization for Zwicker's loudness model—Application to noise barriers. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 237, 130-151.

8. Sigmund, O., Schevenels, M., Lazarov, B. S., & Lombaert, G. (2016). Topology optimization of two-dimensional elastic wave barriers. *Journal of Sound and Vibration*, 376, 95-111.

9. Didkovskiy, V., Zaets, V., & Kotenko, S. (2020). Improvement of the efficiency of noise protective screens due to sound absorption. *Technology audit and production reserves*, 3(1), 53.

10. Zaets, V., & Bida, D. (2021). Influence of sound-absorbing properties of noise protection barriers on road traffic participants. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(1), 62.

11. Didkovskiy, V., Naida, S., & Zaets, V. (2019). Experimental study into the Helmholtz resonators' resonance properties over a broad frequency band. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(5), 34-39.

12. Вовк, И. В., Мацьпура, В. Т., & Сотникова, Т. А. (2006). Об одном методе повышения эффективности шумоподавляющих барьеров.

13. Zaets, V. P. (2012). Noise reduction with soundproof screens. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(10), 25-33.