# МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

## МЕЛЬНИК МИХАЙЛО РОМАНОВИЧ

УДК 004.94-534.84(043.5)

## ДИСЕРТАЦІЯ

# МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОКРАЩЕННЯ АКУСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАКРИТИХ ПРИМІЩЕНЬ

05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ М.Р. Мельник.

Науковий консультант – Лобур Михайло Васильович, д.т. н., професор



/Ростислав БУНЬ/

#### АНОТАЦІЯ

*Мельник М.Р.* Моделі, методи та засоби дослідження та покращення акустичних властивостей закритих приміщень. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2025.

У дисертаційні роботі вирішено наукову проблему розроблення моделей, методів та апаратно-програмних засобів акустометрії з використанням концептуального (Conceptual Design) та предметно-орієнтованого (Domain Driven Design) проєктування. Запропоновано комплексний системний підхід, який інтегрує інноваційні методи векторного імпульсно-частотного зондування, оптимізації параметрів сигнального перетворення та синтезу електроакустичних макромоделей із застосуванням технологій цифрової обробки сигналів та систем автоматизованого проектування.

В роботі розглянуто та вирішено протиріччя між потребою у високоточних, прецизійних вимірюваннях акустичних характеристик приміщень та вимогами ДО масового використання компактних, енергоефективних пристроїв для дослідницьких і проектних завдань. З одного боку, точність вимірювань забезпечується використанням методів детектування одночастотних імпульсів, кореляційних та автокореляційних алгоритмів, оптимізації ширини зондуючих імпульсів і розрахунку параметрів ехо-сигналів, з іншого – впровадженням принципів повсюдного комп'ютингу та Індустріального Інтернету Речей (ПоТ) до систем акустометрії, що дає змогу забезпечити їх універсальність, адаптивність і масштабованість.

Отримані результати мають високий практичний потенціал для застосування у різних галузях, зокрема в оптимізації акустичних характеристик концертних залів, театральних і конференц-залів, офісних та житлових будівель, а також у розробці мобільних пристроїв для швидких акустичних вимірювань. Розроблені методи сприяють удосконаленню процесів автоматизованого проектування акустичних систем, забезпечують надійність і достовірність вимірювань в умовах експлуатації та відкривають нові перспективи для впровадження інтелектуальних рішень у сфері акустометрії.

Таким чином, дисертаційне дослідження спрямоване на комплексне вирішення проблеми оптимізації акустичних характеристик закритих приміщень через інтеграцію сучасних інформаційних технологій і методів автоматизації.

У *першому* розділі проведено аналіз проблематики дисертаційної роботи. Показано, що процес розроблення систем акустометрії є комплексним і базується на моделях, методах та засобах дослідження акустичних властивостей приміщень. В ході аналізу тенденцій розвитку та наукової літератури за тематикою дисертаційної роботи показано роль трьох основних факторів розвитку акустометрії з погляду домінуючого впливу сучасних інформаційних технологій, комп'ютерних наук та методів автоматизованого проектування засобів дослідження акустики приміщень.

У *другому* розділі запропоновано новий метод акустометрії з формулюванням оригінального терміну векторне імпульсно-частотне зондування (IЧЗ). З метою дослідження ефективності частотної селекції сигналів акустометрії та виявлення закономірностей такої селекції з врахуванням параметрів перетворення сигналів розроблено математичну модель та програмне забезпечення M-Signal.

розділі У третьому аналізуються та вирішуються проблеми автоматизованого проєктування компонентів систем акустометрії. Розроблено макромодель, що описує параметри структури MEMS мікрофонів з функцію вимірювального перетворення тиску (P-Probe) та теплових сенсорів потоку з функцією вимірювального перетворення швидкості потоку (U-Probe) повітря. Представлено синтезу макромоделі електро-акустичних етапи перетворювачів.

У *четвертому* розділі проводиться синтез SPICE моделей сигнальних трактів систем акустометрії, як етапу комплексу науково-прикладних робіт по розробленню засобів дослідження та покращення акустичних властивостей приміщень. Розглянуті закритих основні методи та макромоделі функціонального аналізу сигнальних трактів, зокрема наведена ілюстрація бібліотек математичного аналізу в сучасних версіях SPICE-сумісних системмодельних досліджень. Представлено етапи та приклади розроблення моделі симулятора віртуальних сигналів Data@Sim, що призначений для удосконалення методів перетворення сигналів та верифікації моделей САПР акустометрії. Сформульоване протиріччя між вимогами до просторової роздільної здатності та частотної селективності. Для вирішення якого розроблено метод оптимізації перетворення сигналів з аналізом функції залежності ширини імпульсу звукових коливань від параметрів сигналу. Представлені етапи та приклади реалізації цього методу.

У п'ятому розділі представлено розвиток спеціалізованих засобів досліджень акустики. Відповідно до основних підходів запропонованої математичної моделі та програмного забезпечення M-Signal розрахунку ефективності частотної селекції сигналів вирішена задача розроблення вбудованої системи дослідження акустичних параметрів AMES. Проведено аналіз проблем, що виникають під час дослідження акустичних характеристик приміщень з врахуванням вимог розвитку інформаційних технологій та комп'ютерної техніки в галузі акустометрії. Показано, що основним протиріччям в цьому процесі є реалізація прецизійних та достовірних вимірювань при переході від доволі унікальних методів та засобів досліджень акустики до малогабаритних масових пристроїв сучасної комп'ютерної техніки. Першим викликом є вимірювання акустичних параметрів в приміщеннях з присутністю людей та працюючого обладнання відповідно до технологій адаптивної акустики, а другим – реалізація апаратури дослідження без необхідності використання габаритних та прецизійних компонентів, зокрема студійних мікрофонів. Відтак акцентується, що важливою складовою

вирішення даного протиріччя є комплексна верифікація використовуваних засобів дослідження акустики. Запропоновано метод та послідовність такої верифікації.

Шостий розділ присвячено подальшому розвитку методів акустометрії, спрямованих на визначення та оптимізацію акустичних характеристик пористих матеріалів. У розділі розглянуто нові підходи до вимірювання та моделювання опору потоку повітря в пористих матеріалах, що є одним із ключових параметрів при визначенні їх звукопоглинальних властивостей. Зокрема, акцент зроблено на розробленні нових методів, модифікації лабораторного обладнання, удосконаленні алгоритмів аналізу даних та підбору акустичних матеріалів для досягнення заданих характеристик. Проведено аналіз методів, які використовуються для визначення опору повітряному потоку пористих матеріалів. Представлено розроблені методи та програмні комплекси, призначені для автоматизації процесу вимірювання та аналізу результатів звукопоглинальних властивостей пористих матеріалів.

У сьомому розділі досліджується алгоритмічна та архітектурна основа розробки автоматизованих систем добору акустичних параметрів та матеріалів. Представлено основні етапи роботи таких систем та розроблено інформаційні моделі для підсистем, зокрема для класифікації акустичних матеріалів. Визначено специфічні вимоги до систем автоматизації в акустиці, такі як інтеграція з CAD-системами і відповідність високим стандартам. Представлено розроблену підсистему автоматизованого добору звукоізоляційних матеріалів, яка містить дві бази даних: базу даних ізоляційних матеріалів базу i даних підтримки процесу добору звукоізоляційних матеріалів. Підсистема складається із наступних модулів: внесення даних про звукоізоляційні матеріали, автоматичний розрахунок інших звукоізоляційних параметрів, вибірку та автоматичну класифікацію будівельних елементів (вікон, дверей, тощо) за різними класами звукоізоляційності, добір необхідних звукоізолюючих матеріалів за заданими критеріями, розрахунок звукоізоляції та автоматизоване формування звітів.

У восьмому розділі розглядаються апробації методів акустометрії, що калібрування, моделювання включає створення, та експериментальне дослідження акустичних властивостей закритих приміщень різного Наведено комплексні аналізу. призначення. методи перевірки та вдосконалення акустичних характеристик об'єктів з використанням сучасних інструментів моделювання та експериментальних досліджень. Виконано експериментальні дослідження часу реверберації для різних типів приміщень, включно з сакральними об'єктами, театрами й аудиторіями, проаналізовано їх акустичні параметри. Висвітлено методи визначення часу реверберації, адаптивну акустику, метод змінного середнього для розрахунку часу реверберації та підсистеми для аналізу імпульсного шуму. Узагальнено результати досліджень, що демонструють ефективність розроблених методів для підвищення якості акустичних систем. Представлено розроблену модель конвертера для передачі даних із системи SketchUP до системи Catt-Acoustic, забезпечує спрощення процесу переносу геометричних моделей ЩО приміщень. Для автоматизації процесу задання звукопоглинаючих та звукорозсіюючих властивостей матеріалів запропоновано метод, ідея якого полягає в автоматичному заданні акустичних властивостей матеріалів використаних у системі SketchUP при експорті моделі до системи Catt-Acoustic.

Ключові слова: САПР, інформаційні моделі, цифрова обробка сигналів, акустика, акустичні властивості приміщень, SPICE-моделювання, звукопоглинальні матеріали, час реверберації, оптимізація сигналів.

#### ABSTRACT

*Melnyk M.R.* Models, methods, and tools for research and improving the acoustic properties of enclosed spaces. – Manuscript.

Thesis for a Doctoral degree in Technical Science, specialty 05.13.12 – Systems for Automation of Design Works. – National University «Lviv Polytechnic» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2025.

In the dissertation, a scientific problem is addressed – namely, the development of models, methods, and hardware-software tools for acoustometry using Conceptual Design and Domain Driven Design approaches. A comprehensive systems approach is proposed, integrating innovative methods of vector pulsefrequency sounding, optimization of signal conversion parameters, and the synthesis of electroacoustic macromodels by employing digital signal processing technologies and automated design systems. The work examines and resolves the contradiction between the need for highly precise, accurate measurements of the acoustic characteristics of enclosed spaces and the requirements for the mass use of compact, energy-efficient devices for research and design tasks. On one hand, measurement accuracy is ensured by employing methods for detecting single-frequency pulses, correlation and autocorrelation algorithms, optimization of the probing pulse width, and calculation of echo signal parameters; on the other hand, the implementation of ubiquitous computing principles and the Industrial Internet of Things (IIoT) in acoustometry systems allows for ensuring their universality, adaptability, and scalability. The obtained results have high practical potential for application in various fields, including the optimization of acoustic characteristics of concert halls, theaters, conference rooms, office and residential buildings, as well as in the development of mobile devices for rapid acoustic measurements. The developed methods contribute to the improvement of the processes of automated design of acoustic systems, ensuring the reliability and accuracy of measurements under operational conditions and opening new prospects for the implementation of intelligent solutions in the field of acoustometry. Thus, the dissertation is aimed at

the comprehensive resolution of the problem of optimizing the acoustic characteristics of enclosed spaces through the integration of modern information technologies and automation methods. Chapter 1 presents an analysis of the problem area of the dissertation. It is shown that the process of developing acoustometry systems is complex and based on models, methods, and tools for investigating acoustic properties of spaces. An analysis of development trends and the scientific literature on the topic demonstrates the role of three main factors in the development of acoustometry, considering the dominant impact of modern information technologies, computer science, and automated design methods on researching acoustic properties of spaces. Chapter 2 proposes a new acoustometry method, introducing the original term "vector pulse-frequency sounding" (PFS). To study the efficiency of the frequency selection of acoustometry signals and to identify the regularities of such selection considering the parameters of signal conversion, a mathematical model and the M-Signal software have been developed. Chapter 3 analyzes and addresses the problems of automated design of components for acoustometry systems. A macromodel is developed that describes the parameters of the structure of MEMS microphones with the function of pressure measurement conversion (P-Probe) and thermal flow sensors with the function of air flow speed measurement conversion (U-Probe). The stages of synthesizing the macromodel of electroacoustic transducers are presented. Chapter 4 is devoted to the synthesis of SPICE models of the signal paths in acoustometry systems, as part of a complex of applied research works aimed at developing tools for investigating and improving the acoustic properties of enclosed spaces. The main methods and macromodels for the functional analysis of signal paths are reviewed, including an illustration of the mathematical analysis libraries in modern SPICE-compatible modeling systems. The stages and examples of developing the virtual signal simulator model Data@Sim, which is designed to improve the methods of signal conversion and verify the models of automated design systems in acoustometry, are presented. A contradiction is formulated between the requirements for spatial resolution and frequency selectivity. To resolve this, a method for optimizing signal conversion is

developed by analyzing the function of the dependence of the pulse width of sound oscillations on the signal parameters. The stages and examples of the implementation of this method are provided. Chapter 5 presents the development of specialized tools for acoustic investigations. Based on the main approaches of the proposed mathematical model and the M-Signal software for calculating the efficiency of frequency selection of signals, the task of developing an embedded system for acoustic parameter measurements (AMES) is solved. An analysis is conducted of the problems that arise during the investigation of the acoustic characteristics of spaces considering the requirements for the development of information technologies and computer equipment in the field of acoustometry. It is shown that the main contradiction in this process is achieving precise and reliable measurements when transitioning from rather unique methods and tools for acoustic research to compact, mass-produced devices of modern computer technology. The first challenge is measuring acoustic parameters in spaces with the presence of people and operating equipment according to adaptive acoustics technologies, and the second is implementing measurement apparatus without the need for bulky and high-precision components, such as studio microphones. Therefore, it is emphasized that a crucial element in resolving this contradiction is the comprehensive verification of the acoustic measurement tools. A method and a sequence for such verification are proposed. Chapter 6 is dedicated to the further development of acoustometry methods aimed at determining and optimizing the acoustic properties of porous materials. This chapter examines new approaches to measuring and modeling the air flow resistance in porous materials, which is one of the key parameters in determining their sound absorption properties. In particular, attention is focused on developing new methods, modifications of laboratory equipment, improvements in data analysis algorithms, and the selection of acoustic materials to achieve the specified characteristics. An analysis is carried out of the methods used to determine the air flow resistance of porous materials. The developed methods and software complexes, designed for automating the process of measuring and analyzing the results of the sound absorption properties of porous materials, are

presented. The proposed solutions establish the relationship between the specific air flow resistance and the frequency-dependent sound absorption coefficient obtained from experimental measurements in an impedance tube. Chapter 7 investigates the algorithmic and architectural basis for developing automated systems for selecting acoustic parameters and materials. The main stages of the operation of such systems are presented, and information models for the subsystems are developed, particularly for the classification of acoustic materials. Specific requirements for automation systems in acoustics are defined, such as integration with CAD systems and compliance with high standards. An automated subsystem for selecting soundinsulating materials is presented, which contains two databases: a database of insulating materials and a support database for the selection process of soundinsulating materials. This subsystem consists of the following modules: input of data on sound-insulating materials, automatic calculation of other sound-insulation parameters, selection and automated classification of building elements (windows, doors, etc.) by different sound insulation classes, addition of new spaces, selection of the required sound-insulating materials according to specified criteria, calculation of sound insulation, and automated report generation. Chapter 8 examines the testing of the developed acoustometry methods, which includes the creation, calibration, modeling, and experimental investigation of the acoustic properties of enclosed spaces of various purposes. Comprehensive methods for the analysis, verification, and improvement of the acoustic characteristics of objects are presented using modern modeling tools and experimental investigations. Experimental studies of reverberation time have been carried out for different types of spaces, including sacred objects, theaters, and auditoriums, and their acoustic parameters have been analyzed. Methods for determining reverberation time, adaptive acoustics, the moving average method for calculating reverberation time, and subsystems for analyzing impulse noise are discussed. The results of the studies, demonstrating the effectiveness of the developed methods for improving the quality of acoustic systems, are summarized. A converter model for transferring data from the SketchUp system to the Catt-Acoustic system is presented, which simplifies the

process of transferring geometric models of spaces. To automate the process of assigning sound-absorbing and sound-scattering properties to materials, a method is proposed whose idea is based on the automatic assignment of the acoustic properties of materials used in SketchUp when exporting a model to the Catt-Acoustic system.

**Keywords**: CAD, information models, digital signal processing, acoustics, acoustic properties of enclosed spaces, SPICE modeling, sound-absorbing materials, reverberation time, signal optimization.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ Монографії

1. Голяка Р.Л., Лобур М.В., Мельник М. Р. Методи дослідження акустичних властивостей приміщень з покращеною селективністю : монографія / за ред. Р.Л. Голяки ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львівська політехніка». Львів: Новий-світ-2000, 2024. 245 с.

2. Мельник М. Р. Комплексні моделі вбудованих систем in-situ акустометрії. Системи вбудованої самодіагностики мікроелектронних сенсорних пристроїв : монографія / за ред. Р. Л. Голяки ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львівська політехніка». Львів: Новий-світ-2000, 2024. С. 182–237.

3. Андрійчук М. І., Лобур М. В., Мельник М. Р. Моделювання середовищ із заданими акустичними і електромагнітними характеристиками : монографія. Львів: СПОЛОМ, 2023. 272 с.

4. Pytel K., Noga H., Melnyk M. Wpływ zanieczyszczenia powietrza na zdrowie i środowisko naturalne oraz wybrane działania prewencyjne. Problemy ochrony i inżynierii środowiska : monografia / red. M. Banaś. Krakow: Wydaw. Akad. Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie, 2023. S. 95–102.

 Banaś M. Pytel K., Kosobutskyy P., Lobur M., Melnyk M. Electromagnetic modelling of the optical systems : monografia. Kraków: Wydaw. Nauk. Uniw. Ped., 2021. 186 p. 6. Łukaszewicz A., Skorulski G., Melnyk M., Kernytskyy A., Zdobytskyi A., Kolesnyk K. Engineering drawing education using CAD tools. CAD in machinery design. Implementation and educational issues. XXIX International Polish-Ukrainian conference : collective monograph. Kraków: Wydaw. AGH, 2023. P. 95–102.

7. Trochimczuk R., Łukaszewicz A., Melnyk M., Kernytskyy A. Design of mechatronics systems using CAx environment. Methods and tools in CAD - selected issues : monograph / Białystok Univ. of Technology. Białystok: Publ. House of Białystok Univ. of Technology, 2021. P. 7–14.

## Статті у наукових фахових виданнях України

8. Мельник М., Керницький А., Винарович Р., Шварц М., Попович I. Інформаційна система визначення рівня шуму на вибраних вулицях міста Львова. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Інформаційні системи та мережі. 2024. Вип. 16. С. 121–132.

9. Мельник М., Винарович Р., Гасюк Ю., Шварц М. Удосконалення навігаційної системи пристрою дефектоскопії підземних труб. Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2024. Вип. 6, № 1. С. 117–126.

10. Мельник М., Сало Ю. Математична модель локалізації поширення інфразвукового сигналу. Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2024. Вип. 6, № 1. С. 169–177.

11. Melnyk M., Patereha Yu. Prediction of the occurrence of stroke based on machine learning models. Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2024. Вип. 6, № 1. С. 17–27.

12. Гасюк Ю., Йовбак А., Мельник М., Винарович Р., Попович I. Проблеми безпеки в системах розумного дому. Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2023. Вип. 5, № 1. С. 71–81.

13. Melnyk M., Pytel K., Orynchak M., Tomyuk V., Havran V. Analysis of artificial intelligence methods for rail transport traffic noise detection. Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2022. Вип. 4, № 1. С. 107–116.

14. Андрійчук М. І., Мельник М. Р. Синтез плоских хвилеводних антенних решіток з урахуванням взаємного впливу випромінювачів. Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка. 2021. Т. 64, № 9. С. 538–549.

15. Гавран В., Мельник М., Оринчак М. Дослідження методів прогнозування рівня шуму від рейкових транспортних засобів на прикладі м. Львова. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Інформаційні системи та мережі. 2021. Вип. 10. С. 33–40.

16. Melnyk M., Kernyskyy A., Lobur M. Comparison of methods for measuring reverberation time. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2019. № 908. С. 11–17.

17. Мельник М., Керницький А., Рубаха Я., Камісінскі Т. Метод визначення опору потоку повітря пористих матеріалів на основі коефіцієнтів звукопоглинання. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Інформаційні системи та мережі. 2018. Вип. 6. С. 52–65.

18. Melnyk M., Kamisiński T., Kernyskyy A., Lobur M. Automated evaluation of acoustical quality of opera houses and concert halls by beranek's method. Visnyk of Lviv Polytechnic National University. Series: Computer Design Systems. Theory and Practice. 2017. No. 882. P. 57–63.

19. Мельник М. Р., Винарович Р. І., Квасниця Т. Р., Керницький А. Б. Проектування всеспрямованого джерела звуку для автоматизації процесу акустичних вимірювань. Комп'ютерні технології друкарства. 2017. № 2 (38). С. 97–106.

20. Мельник М. Р., Керницький А. Б., Рубаха Я., Камісінські Т. Розроблення конвертера 3D-моделей приміщень з системи SketchUP у систему Catt-Acoustic. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Інформаційні системи та мережі. 2018. № 901. С. 89–96.

21. Melnyk M., Martynyak A., Kernytskyy A. Reverberation time study of an auditorium. Bulletin of Lviv Polytechnic Nat. University. Series: Computer Design Systems. Theory and Practice. 2016. No. 859. P. 56–61.

22. Мельник М., Керницький А. Інформаційна модель бази даних акустичних матеріалів. Комп'ютерні технології друкарства. 2017. № 1 (37). С. 118–128.

23. Мельник М. Р., Керницький А. Б. Дослідження методів визначення часу реверберації Т20. Комп'ютерні технології друкарства. 2017. № 1 (37). С. 102–109.

24. Melnyk M., Kernytskyy A., Zajac P., Szermer M., Maj C., Zabierowski W. Optimization of microelectric actuator design using golden section search to get the defined output characteristics. Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Series: Computer Design Systems. Theory and Practice. 2014. No. 808. P. 77–84.

## Статті у наукових періодичних виданнях інших держав із напряму, з якого підготовлена дисертація, та у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus, Web of Science

25. Plecinski P., Bokla N., Klymkovych T., Melnyk M., Zabierowski W. Comparison of representative microservices technologies in terms of performance for use for projects based on sensor networks. Sensors (Switzerland). 2022. Vol. 22, iss. 20. 7759.

26. Kalwar A., Kurdziel F., Pytel K., Gumula S., Lobur M., Melnyk M. The use of information systems for regulation of gas engine operating parameters. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1016 : CAD in machinery design: implementation and educational issues CADMD 2020, Lviv, Ukraine, 26-27 Nov. 2020. 012020.

27. Melnyk M., Kernyskyy A., Mykhalyna Y., Pytel K. Experimental study of the time of reverberation of a sacred building having a cruciform architecture. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1016 : CAD in machinery design: implementation and educational issues CADMD 2020, Lviv, Ukraine, 26-27 Nov. 2020. 012023.

28. Iwaniec J., Litak G., Iwaniec M., Margielewicz J., Gaska D., Melnyk M., Zabierowski W. Response identification in a vibration energy-harvesting system with quasi-zero stiffness and two potential wells. Energies. 2021. Vol. 14, iss. 13. 3926.

29. Andriychuk M., Melnyk M. Synthesis of plane waveguide arrays taking into account mutual coupling of radiators. Radioelectronics and Communications Systems. 2021. Vol. 64, iss. 9. P. 471–481.

30. Rubacha J., Kinash R., Kamisiński T., Binek W., Baruch K., Chojnacki B., Pilch A., Melnyk M. Analysis of the acoustic parameters of the Maria Zankovetska theatre in the Lviv before and after modernisation of the audience. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 471, iss. 8. : 3rd World multidisciplinary civil engineering, architecture, urban planning symp. WMCAUS 2018, Prague, Czech Republic, 18-22 June 2018. 145505.

31. Melnyk M., Kernytskyy A., Lobur M. Comparison of methods for measuring reverberation time. Machine Dynamics Research. 2018. Vol. 42, No. 2. P. 27–34.

32. Melnyk M., Kernytskyy A., Stefanskyy A. Development of CAD structure for design of aerostatic complex. Machine Dynamics Research. 2013. Vol. 37, No. 3. P. 61–65.

33. Melnyk M., Salo Y., Timofiejczuk A., Sitek W., Popovych I., Vynarovych R. Mathematical model for attenuated infrasound wave propagation. 2024 29th IEEE Intern. seminar/workshop "Direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory" DIPED 2024, Tbilisi, Georgia, 11-13 Sept. 2024. P. 231–235.

34. Klymkovych T., Bokla N., Matviykiv O., Stakhiv V., Melnyk M. Numerical simulation and analysis of the acoustic standing wave field stability in acoustofluidic microchannel. 2022 18th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2022, Polyana, Ukraine, 7-11 Sept. 2022. P. 57–60.

35. Andriychuk M., Melnyk M., Orynchak M. Investigation of response from the micro objects of complex shape irradiated by acoustic wave. 2023 IEEE 17th Intern. conf. on the experience of designing and application of CAD systems CADSM 2023: proc., Jaroslaw, Poland, 22-25 Febr. 2023. P. 18–22.

36. Bokla N., Klymkovych T., Matviykiv O., Stakhiv V., Melnyk M. Design and simulation of microfluidic Lab-chip for detecting heavy metals in water samples. 2021 17th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2021, Polyana, Ukraine, 12-16 May 2021. P. 46–49.

37. Orynchak M., Melnyk M., Havran V. Methods for forecasting the noise level of rail vehicles. 2021 26th IEEE Intern. seminar/workshop "Direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory" DIPED 2021, Tbilisi, Georgia, 8-10 Sept. 2021. P. 253–256.

38. Matviykiv O., Klymkovych T., Bokla N., Lobur M., Melnyk M., Timofiejczuk A. Simulation of acoustophoretic separation of microplastic particles in mkFluidic Lab-chip. 2020 16th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2020, Lviv, Ukraine, Apr. 22–26, 2020. P. 123–126.

39. Guzowski B., Gozdur R., Melnyk M., Lobur M., Matviykiv O. Efficiency evaluation of photovoltaic power converters for ultra-low power supply systems. 2019 IEEE XVth Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2019, Polyana, 22-26 May 2019. P. 56–60.

40. Melnyk M., Kamisinski T., Rubacha J., Majchrzak A. Application of MEMS sensors to the automation of a laboratory stand for the measurement of the flow resistance of porous materials. 2018 14th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2018, Lviv. Ukraine, 18-22 Apr. 2018. P. 28–34.

41. Depa K., Melnyk O., Melnyk M., Bokla N., Lobur M. The autonomous power supply for systems of acoustic climate control and traffic flows. 2018 14th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2018, Lviv. Ukraine, 18-22 Apr. 2018. P. 268–271.

42. Melnyk M., Kernyskyy A., Rubacha J., Kamisiński T. SketchUP to Catt-Acoustic converter of interior design 3D models. 2018 23rd IEEE Intern. seminar/workshop "Direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory" DIPED 2018, Tbilisi, Georgia, 24-27 Sept. 2018. P. 165–169.

43. Melnyk M., Kernyskyy A., Pukach P. Development of subsystems for reverberation time definition in lecture auditorium. 2017 IEEE 14th Intern. conf. on the experience of designing and application of CAD systems CADSM 2017:proc., Lviv - Polyana, Ukraine, 21-25 Febr. 2017. P. 354–356.

44. Diveyev B., Konyk S., Melnyk M., Vysocka C. Acoustical performance of layered beams in the lower frequency range. 2017 13th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2017, Lviv. Ukraine, 20-23 Apr. 2017. P. 91–95.

45. Melnyk M., Basalkevych O. Identification of moving objects in video by means of a graph model. 2016 12th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2016, Lviv - Polyana, Ukraine, 20-24 Apr. 2016. P. 170–174.

46. Knapkiewicz P., Melnyk M., Teslyuk V., Dziuban J., Lobur M., Szermer M. Mechatronic laboratory stand. 2016 12th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2016, Lviv - Polyana, Ukraine, 20-24 Apr. 2016. P. 31–33.

# Статті у наукових періодичних виданнях України, що додатково відображають результати дисертаційних досліджень

47. Melnyk M. Development of a method for automated selection of sound absorbtion coefficients. Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: Computer Design Systems. Theory and Practice. 2019. Issue 1 No. 1. P. 61–70.

## Статті в матеріалах конференцій, які індексовані у наукометричних базах Scopus та Web of Science

48. Melnyk M., Vynarovych R., Kvasnytsya T., Lobur M. Designing of omnidirectional speaker for automation of acoustic measurement process. 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) : proceedings of 14th International conference, 20–24 Feb., 2018, Lviv, Slavske, Ukraine. 2018. P. 380–383.

49. Melnyk M., Lobur M., Kernyskyy A., Szermer M., Zajac P., Maj C., Zabierowski W. Custom method for automation of microbolometer design and simulation. 2015 22nd International Conference Mixed Design of Integrated Circuits & Systems MIXDES 2015: proc., Toruń, Poland, 25–27 June, 2015. P. 301–304.

50. Melnyk M., Kernytskyy A., Lobur M., Zajac P., Maj C., Zabierowski W., Szermer M., Napieralski A. Applying the golden section search in optimization of micro actuator design. Intern. conf. on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics CADSM 2015, Lviv - Polyana, Ukraine, 24-27 Feb. 2015. P. 53–56.

51. Melnyk M., Teslyuk V., Dziuban J., Knapkiewicz P., Kernytskyy A., Lobur M. Comparative analysis of simulation results and experimental data of deflection of silicon membrane of MEMS pressure sensor. 2015 XI International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design MEMSTECH 2015, Lviv - Polyana, Ukraine, 2-6 Sept. 2015. P. 14–17.

52. Melnyk Mykhaylo, Denysyuk Pavlo, Kernytskyy Andriy, Savitska Olha. System for student knowledge control. 2013 12th Int. Conf. on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics CADSM 2013, Polyana, Ukraine, 19-23 Feb. 2013. P. 451–452.

53. Melnyk M., Lobur M., Kernytskyy A., Szermer M., Zajac P., Zabierowski W. Application of a genetic algorithm for dimension optimization of the MEMSbased accelerometer. Proceedings of the 20th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems - MIXDES 2013, Gdynia, Poland, 20-22 June. 2013. P. 352–354.

## Праці, що опубліковані в збірниках тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій

54. Kernytskyy O., Kernyskyy A., Melnyk M., Łukaszewicz A., Banaś M., Pytel K. Software development methods of reverse engineering used in mechanical systems // CAD in machinery design. Implementation and educational issues : proceedings of the XXXI International conference CADMD 2023, Supraśl, Poland, 26-28 October, 2023. P. 58.

55. Mykhaylo Melnyk, Andriy Kernyskyy, Mykhaylo Lobur, Andriy Zdobytskyj, Andrzej Łukaszewicz, Krzysztof Pytel. Investigation of sound level meters accuracy in determining the equivalent sound level. XXIX International Polish-Ukrainian Conference CAD in Machinery Design Implementation and Educational Issues CADMD 2021, Krakow, Poland, 9-10 Dec. 2021. P. 22.

56. Mariia Orynchak, Volodymyr Havran, Mykhaylo Melnyk. Tram noise level determination analysis case study from Lviv. XXIX Int. Polish-Ukrainian Conf. CAD in Machinery Design Implementation and Educational Issues CADMD 2021, Krakow, Poland, 9-10 Dec. 2021. P. 31-32.

57. Rubacha Jaroslaw, Kinash Roman, Kamisiński Tadeusz, Binek Wojciech, Baruch Katarzyna, Chojnacki Bartlomiej, Pilch Adam, Melnyk Mykhalo. Analysis of the acoustic parameters of the Maria Zankovetska theatre in the Lviv before and after modernisation of the audience // World multidisciplinary civil engineering-architecture-urban planning : symposium : abstract collection book, Prague (Czech Republic), 18–22 June 2018. – 2018. – C. 562.

58. Mykhaylo Melnyk, Andriy Kernyskyy, Muhaylo Lobur. Comparison of methods for measuring reverberation time. XXV Polish-Ukrainian conference on "CAD in machinery design-implementation and educational problems" : book of abstracts, Bielsko Biala, Poland, October 20-21, 2017. P. 29–30.

59. Kernyskyy A., Melnyk M., Denysyuk P. Support of CAD design with cloud-based knowledge management. Proceedings of the XXIV Ukrainian-Polish conference "CAD in machinery design. Implementation and educational issues" CADMD'2016, Lviv, Ukraine, 21-22 October. 2016. P. 77.

60. Melnyk M., Lobur M., Kernytskyy A., Szermer M., Zajac P., Zabierowski W. Study of characteristics of MEMS thermo-electric actuators. Proceedings of Xth Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2014, Lviv, Ukraine, 22-24 June. 2014. P. 39–41.

61. P. Zajac, M. Szermer, W. Zabierowski, M. Melnyk, O. Matviykiv, A. Napieralski, M. Lobur, C. Maj. Study of dynamic thermal phenomena during readout of uncooled titanium-based microbolometer. Proceedings of IXth Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2013, Polyana, Ukraine, 16-20 April. 2013. P. 40–42.

62. Teslyuk V., Melnyk M., Kernytskyy A., Zajac P., Szermer M., Zabierowski W. Subsystem for the computer-aided thermo-actuator design // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design : proceedings of VIIIth International Conference MEMSTECH 2012, Polyana, Ukraine, 18-21 April, 2012. P. 197–200.

63. Melnyk M., Kernytskyy A. Modification of image background search algorithm. Proceeding of the XX Ukrainian-Polish conference "CAD in machinery design. Implementation and educational issues". CADMD'2012 Lviv, Ukraine, 11-13 October. 2012. P. 108-111.

64. Melnyk M., Kernytskyy A., Łukaszewicz A. Development of pattern stabilization algorithm Proceeding of the XX Ukrainian-Polish conference "CAD in machinery design. Implementation and educational issues". CADMD'2012 Lviv, Ukraine, 11-13 October. 2012. P. 101-104.

65. Маркелов О. Е., Мельник М. Р., Косовський В. М. Систематизований огляд програмних засобів обробки звукових даних // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології : матеріали II Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2012 (Тернопіль, 04-05 травня 2012). – 2012. – С. 121–123.

21/1	CT
JIVII	

ВСТУ	Π			•••••				25
РОЗДІ	Л1	СУЧАСНІ	I MET	оди	Ι	МОДЕЛІ	ДОСЛ	ідження
АКУС	ТИЧ	НОГО ПРО	ОСТОРУ					
1.1.	Аку	стика прим	іщень					
1.2.	Аку	стичні вим	ірювання					
1.3.	In-si	tu акустика	a					
1.4.	Мод	елювання	в акустиц	i				
1.5.	Осно	овні факто	ри розвит	ку та ст	груктур	а роботи		47
1.6.	Виси	новки до ро	озділу 1					55
РОЗДІ	Л2	OCHOBH	І ПІДХОД	<b>ЦИ, МЕ</b>	тоди	ГА РІШЕНН	ЯR	
2.1.	Мет	од векторн	ого імпул	ьсно-ча	астотно	го зондувани	няк	
2.2.	Фор	мулювання	н задач мо	дельни	іх дослі,	джень		65
2.3.	Мат	ематична	модель	та г	ірограм	не забезпе	чення ј	розрахунку
ефен	ктивн	ості часто	гної селек	ції сигі	налів			71
2.4.	Розв	иток метод	цу аналогі	ї на осі	нові SPI	СЕ макромо	делей	
2.5.	Мат	ематична	модель	cepe,	довищ	із задан	ими ак	устичними
xapa	ктері	истиками	••••••					
2.6.	Виси	новки до ро	озділу 2					119
РОЗДІ	Л3	ЕЛЕКТРО	-АКУСТІ	ИЧНІ S	PICE M	акромоді	ЕЛІ	
3.1.	SPIC	СЕ макромо	оделі елек	тро-аку	устични	х перетворю	вачів	
3.2.	Стру	ктури тери	мічних сеі	нсорів	потоку	акустичної і	мпедансо	метрії. 128
3.3.	Син	гез макром	оделі - ета	ап #1				
3.4.	Син	гез макром	оделі - ета	ап #2				
3.5.	Син	гез макром	оделі - ет	ап #3				
3.6.	Синт	гез макром	оделі - ета	ап #4				148

3.7. Синтез макромоделі - етап #5 152
3.8. Висновки до розділу 3 157
РОЗДІЛ 4МОДЕЛІ СИГНАЛЬНИХ ТРАКТІВ СИСТЕМ АКУСТОМЕТРІЇ
4.1. Постановка задач159
4.2. Основні методи та SPICE макромоделі функціонального аналізу 159
4.3. Схема заміщення та використання моделі симулятора віртуальних сигналів Data@Sim
4.4. Метод оптимізації процесу перетворення сигналів 176
4.5. Висновки до розділу 4 189
РОЗДІЛ 5 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ 
5.1. Спеціалізовані засоби досліджень акустики 191
5.2. Вбудована система дослідження акустичних параметрів 197
5.3. Методи дослідження акустики в інтегрованому середовищі REW 210
5.4. Метод комплексної верифікації процесів дослідження акустичних параметрів
5.5. Висновки до розділу 5
РОЗДІЛ 6 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ
6.1. Аналіз методів визначення коефіцієнта звукопоглинання та постановка задачі
6.2. Удосконалення лабораторної установки вимірювання опору повітряному потоку пористих матеріалів
6.3. Удосконалення та верифікація методу продування потоком повітря
пористих матеріалів

6.4. Інверсний метод визначення питомого опору повітряного потоку
пористих матеріалів
6.5. Інверсний метод визначення питомого опору повітряному потоку
шаруватих матеріалів
6.6. Аналіз чутливості моделей пористих матеріалів 269
6.7. Дослідження розроблених методів
6.8. Пористі матеріали для заповнення акустичних панелей
6.9. Метод синтезу акустичних матеріалів
6.10.Висновки до 6 розділу
РОЗДІЛ 7 ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО
ДОБОРУ АКУСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА МАТЕРІАЛІВ
7.1. Архітектура системи автоматизованого добору акустичних параметрів
та матеріалів
7.2. Інформаційна модель підсистеми класифікації акустичних матеріалів
7.3. Інформаційна модель підсистеми автоматизованого добору
звукоізоляційних матеріалів
7.4. Інформаційна модель підсистеми оцінювання акустичної якості
оперних і концертних залів методом Беранека
7.5. Висновки до розділу
РОЗДІЛ 8 АПРОБАЦІЯ МЕТОДІВ АКУСТОМЕТРІЇ ЗАКРИТИХ
ПРИМІЩЕНЬ
8.1. Модель конвертера із системи SketchUP у систему Catt-Acoustic 319
8.2. Метод автоматизованого добору коефіцієнтів звукопоглинання для
калібрування моделей
8.3. Експериментальне дослідження часу реверберації сакрального об'єкта
226

8.4. Аналіз акустичних параметрів Театру імені Марії	Заньковецької у
Львові до та після модернізації	
8.5. Дослідження часу реверберації лекційної аудиторії	
8.6. Дослідження методів визначення часу реверберації	
8.7. Метод змінного середнього	
8.8. Адаптивна акустика	
8.9. Висновки до 8 розділу	
ВИСНОВКИ	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	
ДОДАТОК А. ІНФОРМАЦІЯ ПРО АПРОБАЦІЮ	РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ	

#### ВСТУП

Актуальність теми. Дослідження акустичних властивостей приміщень та розроблення відповідних систем акустометрії є багатофакторними, комплексними та вимагають унікального прецизійного обладнання. Це обумовлюється широким набором характеристик, за допомогою яких проводять аналіз акустичних властивостей. Їх можна умовно об'єднати в три групи. Перша група базується на вимірюванні частотних властивостей, амплітудно-частотних характеристик (АЧХ), фазо-частотних зокрема, характеристик (ФЧХ) та переліку інших частотних залежностей у вигляді спектрограм. Друга група базується на вимірюванні параметрів взаємодії компонентів середовища зі звуковою хвилею, зокрема, вимірюванні акустичного імпедансу 3 використанням спеціалізованих акустичних інструментів імпедансного типу та представленням результату вимірювання у вигляді дійсної (ефективної) та уявної (реактивної) складових. Третя група базується на вимірюванні динаміки затухання та реверберації звукової хвилі, зокрема - тривалості та АЧХ затухання (Decay) звукових хвиль (Waterfall Plot), часу реверберації (Reverberation Time, RT60, RT30, RT20), часу ранньої реверберації (Early Decay Time, EDT), розбірності мовлення (Clarity), індексу передачі мовлення (Speech Transmission Index, STI), музичної розбірності (Musical Clarity, C80) тощо.

Актуальність теми дослідження, присвяченого розробці методів, моделей та засобів дослідження й покращення акустичних властивостей приміщень, зумовлена постійно зростаючими вимогами до якості акустичного середовища у закритих просторах – від концертних та театральних залів до офісів і житлових будівель. Автоматизація проєктувальних процесів в акустиці дає змогу ефективно впроваджувати нові підходи до створення звукоізоляційних та звукопоглинальних матеріалів, оптимізації акустичних характеристик приміщень, а також забезпечує можливість досягнення нових стандартів якості звуку та комфорту. Дослідження в галузі автоматизованих систем проєктування є важливим напрямом, у рамках якого українські та закордонні вчені зробили вагомий внесок. Значні наукові досягнення у цій сфері належать професору Петренку А.І., який розробив основоположні принципи для створення інформаційних моделей та автоматизації проектувальних робіт, зокрема у застосуванні до багатокомпонентних технічних систем. Його праці стали основою для розвитку сучасних методів автоматизованого проєктування, спрямованих на підвищення точності та ефективності процесів моделювання.

Особливий внесок у розвиток методів і засобів автоматизації проектувальних робіт зробила також професор Глоба Л.С., яка здійснила комплексні дослідження з моделювання інформаційних процесів у системах автоматизованого проєктування. Її наукові роботи стосуються розробки алгоритмів і програмного забезпечення для автоматизованого керування проєктуванням, що є надзвичайно актуальним для досліджень, пов'язаних із покращенням акустичних властивостей приміщень.

У галузі акустики провідними фахівцями в дослідженні акустичних характеристик приміщень та методів їх поліпшення є такі вчені, як Л. Беранек (США), який вивчав методи підвищення звукопоглинальних властивостей матеріалів, та Т. Кокс (Велика Британія), який розробив методики вимірювання акустичних параметрів і досліджував особливості звукових полів у закритих просторах. Їхні роботи сприяли розвитку моделей і методів, що дають можливість точно вимірювати й покращувати акустичні показники різних типів приміщень.

Дисертаційне дослідження спрямоване на розвиток і вдосконалення існуючих моделей та методів автоматизації для вирішення завдань акустичного проєктування. Основними завданнями £ розроблення інноваційних підходів для аналізу акустичних характеристик матеріалів та оптимізація процесів автоматизованого керування акустичними дослідженнями.

Під час аналізу тенденцій розвитку та наукової літератури за тематикою дисертаційної роботи показано роль основних факторів розвитку акустометрії з погляду домінуючого впливу сучасних інформаційних технологій (IT), комп'ютерних наук та методів автоматизованого проєктування засобів дослідження акустики приміщень. Першим фактором є спеціалізація (customization) засобів комп'ютерної техніки в напрямку дослідження параметрів оточуючого середовища, сенсорики, людино-машинної взаємодії. Сформулювались концепції повсюдного комп'ютингу (Ubiquitous computing, UC) та Індустріального Інтернету Речей (Industrial Internet of Things, IIoT), в основі яких лежать вимоги до уніфікованості та масовості. Другим фактором є розвиток інформаційно-вимірювальних технологій в концепціях «розумної» техніки (Smart Tech), зокрема - «розумного» будинку (Smart Home). В акустометрії цей фактор розвитку обумовив поняття адаптивної акустики (State of Art Acoustics). Третім фактором розвитку, що властиво враховує спеціальність даної дисертаційної роботи, є подальший розвиток та спеціалізація систем автоматизованого проєктування (САП, Computer Aided Design, CAD) засобів акустометрії. Компонентами таких САПР є відповідні інформаційні та математичні моделі, як проєктування та дослідження акустики приміщень, так і формування та перетворення інформативних сигналів в системах акустометрії.

дослідження Відтак, подальший розвиток комп'ютерних систем властивостей обумовлює протиріччя між акустичних унікальністю (комплексністю, мультипараметричністю, складністю, прецизійністю) та відповідністю до вимог концепцій UC та ПоТ, а відтак - масовістю виробництва та застосування, надійністю функціонування в різноманітних умовах експлуатації за неможливості періодичного налагодження, обмеженістю щодо використання складного обладнання, мініатюрністю, собівартості незначному енергоспоживанні, низькій та необхідності формувати значні об'єми інформації з врахуванням технологій злиття даних (Data Fusion) та штучного інтелекту AI (Artificial Intelligence).

Сукупність вищенаведених факторів розвитку та виявлене в цій дисертаційній роботі протиріччя можна узагальнити в цілісну **науковоприкладну проблему** розроблення методів, моделей та апаратно-програмних засобів акустометрії, що відповідають вище відзначеним вимогам концепцій UC та ПоТ. Ця проблема вирішується з використанням концепцій концептуального (Conceptual Design) та предметно-орієнтованого (Domain Driven Design) проєктування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження, проведені в межах цієї докторської дисертації, відповідають науковим напрямкам кафедри систем автоматизованого проєктування, пріоритетним напрямам розвитку науки та техніки та підтримані низкою міжнародних і державних наукових програм та проєктів.

Роботу виконано у Національному університеті «Львівська політехніка» в межах бюджетних науково-дослідних робіт (з працевлаштуванням):

- "Високоточні функціонально-інтегровані сенсорні пристрої для магнітної діагностики плазми" (ДБ/ВІС №0121U109618, 2021–2022).

- "Інноваційне використання твердотільних і нанокомпозитних матеріалів для керування субтерагерцовим випромінюванням" (ДБ/СубТера №0119U100609, 2019–2021).

Дисертаційні дослідження виконано відповідно до наукового напрямку кафедри систем автоматизованого проєктування Національного університету «Львівська політехніка»: "Автоматизація проєктування та моделювання вбудованих систем", "Автоматизація проєктування та моделювання систем «розумного будинку»".

NAWA – International Academic Partnerships Program:

- "Academic Partnership of Wroclaw University of Science and Technology" (Ref. no. PPI/APM/2018/1/00031, 2019–2022) сприяв обміну знаннями та новими технологіями між університетами, зокрема щодо застосування сучасних методів моделювання та аналізу акустичних властивостей. Це

співробітництво підтримало застосування інноваційних методів автоматизації в розробленні акустичних моделей.

- "Science without borders" (Ref. no. PPI/APM/2018/1/00049, 2019–2021) надало основу для створення довготривалих міжнародних контактів, спрямованих на розробку нових методів поліпшення параметрів приміщень за допомогою автоматизованих систем дослідження та аналізу акустики.

ТЕМРUS-JPCR – проєкт "Розробка програми для нової спеціальності: "Магістр з інженерії проєктування мікросистем" (2012–2016). Моделювання та симуляційні засоби, які розроблені в рамках цієї програми, посприяли створенню інструментів для автоматизованого аналізу складних систем, включаючи акустичні середовища, що застосовано в цьому дослідженні.

EduMEMS – проєкт Developing Multidomain MEMS Models for Educational Purposes (269295, FP7-PEOPLE-2010-IRSES, 2011–2016), забезпечив обмін знаннями у розробці точних моделей складних середовищ. Розроблені підходи до моделювання застосували для створення акустичних моделей в автоматизованих системах проєктування закритих просторів.

**Мета і завдання дослідження**. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування та предметно-орієнтованого проєктування комп'ютерних систем дослідження акустичних властивостей приміщень.

Для досягнення поставленої мети в межах дисертаційних досліджень визначено необхідність виконання таких завдань:

- Провести аналіз існуючих методів дослідження акустичних властивостей приміщень (акустометрії), їх компонентів та чинників впливу сучасних концепцій UC на подальший розвиток засобів та систем автоматизованого проєктування акустометрії.
- Розробити метод акустометрії, який базуючись на нових підходах векторного імпульсно-частотного зондування вирішує проблему відповідності апаратно-програмних пристроїв акустометрії до концепції повсюдного комп'ютингу.

- 3. Розробити компоненти САПР (методик, математичних моделей, програмного забезпечення), які вирішують проблему встановлення закономірностей перетворення сигналів відповідно до вимог точності такого перетворення в реальних умовах вимірювання акустичних параметрів приміщень.
- 4. Розробити метод синтезу математичних моделей електро-акустичних перетворювачів, який вирішує проблему інтегрування цих моделей у системи автоматизованої параметричної оптимізації засобів акустометрії.
- 5. Розробити метод синтезу SPICE макромоделей сигнальних трактів систем акустометрії та симулятора віртуальних сигналів, що обумовлює удосконалення методів перетворення сигналів та верифікації моделей САПР акустометрії.
- 6. Розробити метод оптимізації перетворення сигналів з аналізом функції залежності оптимальної ширини імпульсу звукових коливань від умов вимірювання акустичних параметрів. Розробити вбудовану систему дослідження акустичних параметрів.
- Розробити метод комплексної верифікації апаратно-програмних засобів дослідження акустики відповідно до вимог пристроїв в концепції повсюдного комп'ютингу.
- Розробити метод порівняння коефіцієнтів звукопоглинання, отриманих із лабораторної установки визначення опору потоку повітря та імпедансної труби.
- 9. Автоматизувати процес визначення коефіцієнту звукопоглинання пористих матеріалів методом визначення опору потоку повітря.
- 10. Розробити метод добору акустичних матеріалів, який дасть змогу визначати параметри (товщину та опір потоку повітря) пористих матеріалів для досягнення необхідних коефіцієнтів звукопоглинання у заданому діапазоні частот.
- 11. Розробити систему автоматизованого добору звукоізоляційних матеріалів, яка інтегрує базу даних із динамічними характеристиками, системою

фільтрів та автоматичним експортом даних для ефективного вибору матеріалів відповідно до вимог конструкцій і будівельних норм.

- 12. Розробити конвертер для автоматизованого експорту геометричних моделей приміщень із системи SketchUp у систему Catt-Acoustic, забезпечивши автоматичне призначення коефіцієнтів звукопоглинання матеріалів.
- 13. Автоматизувати процес добору коефіцієнтів звукопоглинання акустичних матеріалів під час калібрування моделей приміщень у системи Catt-Acoustic.

**Об'єкт** дослідження – процеси формування сигналів та проєктування систем дослідження акустичних властивостей приміщень.

**Предмет дослідження** – методи, моделі та алгоритми перетворення сигналів комп'ютерних систем дослідження акустичних властивостей приміщень та їх предметно-орієнтованого проєктування.

**Методи дослідження**. Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі використали:

- теорії поширення та взаємодії акустичних коливань;
- лабораторного та натурного експериментів;
- математичного та фізичного моделювання;
- перетворення сигналів;
- теорії електронних кіл;
- аналізу, синтезу, оптимізації та аналогії.

## Наукова новизна отриманих результатів.

Уперше розроблено:

 - інверсний метод визначення коефіцієнів опору потоку повітря пористих матеріалів на основі коефіцієнтів звукопоглинання в діапазоні чутних частот використовуючи модель Мікі, що дало змогу порівнювати результати отримані із лабораторної установки продуванням потоком повітря та отриманими із імпедасної труби за рахунок порівняння тільки одного числа опору потокові повітря; - інформаційну модель системи автоматизованого добору звукоізоляційних матеріалів, яка інтегрує базу даних акустичних матеріалів із автоматичною класифікацією, забезпечуючи адаптивний вибір матеріалів відповідно до вимог конструкцій, будівельних норм і типу приміщення, що підвищує універсальність та масштабованість системи та автоматизує експорт даних для подальшого опрацювання;

- модель конвертера для автоматизованого експорту геометричних моделей приміщень із системи SketchUp у систему Catt-Acoustic з автоматичним призначенням коефіцієнтів звукопоглинання матеріалів, що збільшує ефективність моделювання та узгодженість даних між системами;

- метод векторного імпульсно-частотного зондування приміщень, в якому інформативні сигнали акустометрії отримують шляхом формування наборів векторно-направлених одночастотних імпульсів звукових коливань та їх детектування кореляційними та автокореляційними методами частотної селекції, що забезпечує основи предметно-орієнтованого проєктування комп'ютерних систем акустометрії відповідно до концепції UC;

- метод оптимізації перетворення сигналів, який забезпечує оптимізацію ширини імпульсу активуючих звукових коливань за критеріями параметрів поширення сигналу в досліджуваному середовищі, що дає змогу реалізувати автоматизовані системи проєктування засобів акустометрії на основі завадостійкого векторного імпульсно-частотного зондування приміщень;

- метод синтезу імітаційних сигналів, який базується на SPICE макромоделях перехідних процесів, що дає змогу реалізувати САПР апаратнопрограмних засобів акустометрії з розширеними можливостями, зокрема для машинного навчання з використанням нейронних мереж у задачах дослідження акустичних параметрів у приміщеннях зі значним фоновим шумом;

 метод комплексної верифікації процесів та засобів дослідження акустичних параметрів приміщень, який поєднує етапи аналізу інформативності сигналів, впливу акустичного шуму, нелінійних спотворень, коректності процесу вимірювання та якості калібрування, що дає змогу забезпечити комплексність та достовірність функціонування комп'ютерних систем акустометрії та їх автоматизованого проєктування.

Набув подальшого розвитку:

- метод електро-теплової аналогії та синтезу електро-акустичних моделей вимірювальних перетворювачів акустометрії, який на відміну від відомих, поєднує в єдиній макромоделі MEMS структури вимірювального перетворення тиску (Р-зонд) та швидкості потоку (U-зонд) повітря, що дає змогу реалізувати системи автоматизованого проєктування комплексних засобів акустометрії з функцією параметричного аналізу процесів формування інформативних сигналів електричного та акустичного імпедансів;

- метод структурно-функціонального синтезу вбудованої системи акустометрії на основі селективного підсилення заряду, який на відміну від відомих, поєднує кореляційне перетворення та квадратурне детектування з реалізацією в концепції програмованих систем на кристалі, що дає змогу забезпечити завадостійкість вимірювання зміни електричного заряду п'єзоелектричних перетворювачів формування інформативних сигналів параметрів низькочастотних вібрацій.

Удосконалено:

- метод добору коефіцієнтів звукопоглинання акустичних матеріалів для системи Catt-Acoustic, який полягає у зворотному визначенні коефіцієнтів звукопоглинання через формулу Сабіна і дає змогу за одну ітерацію досягнути точність визначення часу реверберації до 0,5 с;

- метод визначення опору потокові повітря, який описує залежність між швидкістю повітряного потоку та перепадом тиску (q( $\Delta p$ )), шляхом вибору діапазону даних для лінійної апроксимації використовуючи функцію залежності опору повітряному потоку до швидкості повітряного потоку, що дало змогу підвищити точність та повторюваність вимірювань порівняно з раніше використовуваним підходом;

- метод добору акустичних матеріалів, який дав змогу використовуючи інверсний метод дібрати товщину та опір потоку повітря пористого матеріалу для отримання необхідних коефіцієнтів звукопоглинання в заданому діапазоні частот.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх безпосереднього застосування під час предметно-орієнтованого проєктування комп'ютерних систем акустометрії відповідно до концепцій UC, Індустрії 4.0 та ПоТ, в яких акцент робиться на реалізації апаратно-програмних пристроїв, що відповідають критеріям:

- універсальності та надійності функціонування в різноманітних (мало адаптованих) умовах експлуатації за неможливості періодичного налагодження (калібрування);
- обмеженості щодо використання складного (прецизійного, енергозатратного, громісткого тощо) обладнання;
- мініатюрності, незначного енергоспоживання, низькій собівартості за масового автоматизованого виробництва, тощо;
- необхідності формувати значні об'єми інформації з врахуванням концепцій злиття даних та штучного інтелекту.

Зокрема:

- Розроблено алгоритм дослідження акустичних властивостей закритих приміщень, який відповідає критеріям предметно-орієнтованого проєктування комп'ютерних систем акустометрії відповідно до концепції UC і є синергією трьох взаємодоповнюваних рішень:
- дослідження проводять шляхом збурень зондуючих імпульсів звукових коливань, тривалість та спектр яких оптимізується відповідно до задач та умов експерименту;
- формування зондуючих імпульсів у досліджуваному приміщенні відбувається з використанням векторного (селективно-направленого в просторі) активування звукових коливань;
- синтез набору інформативних сигналів відбувається шляхом формування

імпульсів звукових коливань із заданим відповідно до алгоритму дослідження набором одночастотних коливань, детектування яких здійснюється на основі кореляційних та автокореляційних методів частотної селекції.

- Розроблено математичну модель та програмне забезпечення M-Signal, які дають змогу встановлювати характерні закономірності частотної селекції, що слугує основою вибору методу та параметрів перетворення сигналів відповідно до вимог точності такого перетворення та умов вимірювання акустичних параметрів приміщень.
- 3. Розроблена SPICE макромодель поєднує процеси формування сигналів трьох типів – електричних, акустичних та теплових, що надає змогу інтегрування математичних моделей електро-акустичних перетворювачів у САПР оптимізації акустометричних перетворювачів сигналів.
- Розроблений алгоритм комплексної верифікації процесів та засобів дослідження акустичних параметрів приміщень дає змогу встановити закономірності перетворення сигналів.
- 5. Розроблений алгоритм аналізу закономірностей якості інформативного сигналу дає змогу провести оптимізацію процесу перетворення сигналів за методом векторного імпульсно-частотного зондування приміщень.
- 6. Розроблене програмне забезпечення опрацювання експерементальних даних із лабораторної установки вимірювання опору повітряному потоку пористих матеріалів та імпедансної труби автоматизовує визначення, порівняння та добір коефіцієнтів звукопоглинання.
- 7. Розроблене інформаційне, програмне методичне забезпечення та звукоізоляційних матеріалів підсистеми автоматизованого добору підвищило ефективність проєктування звукоізоляції будівель і акустичних приміщень завдяки автоматизації формування звітів і документації, що скорочує час виконання проєктних робіт. Упровадження динамічних полів характеристик дало змогу оптимізувати структуру бази даних, зменшивши її розмірність та забезпечивши можливість додавання нових типів

матеріалів і їхніх характеристик, що робить підсистему гнучким інструментом для широкого спектра акустичних завдань.

 Розроблена підсистема оцінки акустичної якості приміщень методом Беранека автоматизовує процес аналізу акустичних параметрів оперних і концертних залів, підвищує ефективність їх проєктування та оптимізації.

Використання результатів дослідження. Отримані результати під час виконання представленого дисертаційного дослідження запроваджено в ДП «Національний академічний український драматичний театр ім. Марії Заньковецької», м. Львів, Акт про впровадження від 20.11.2024 р.; Лабораторії технічної акустики кафедри Механіки і Віброакустики Краківської Гірничометалургійної академії ім. С. Сташиця (Польща), Акт про впровадження від 06.11.2024 р.; у навчальному процесі на кафедрі систем автоматизованого проєктування Національного університету «Львівська політехніка» та під час виконання НДР за кошти державного бюджету МОН України № 0121U109618 та 0119U100609, що підтверджено Актами про впровадження від 14.11.2024 р.

## Особистий внесок здобувача.

Всі наукові результати в дисертаційній роботі, зокрема ті, що складають наукову новизну, одержані автором особисто. Роботи [2, 47] – одноосібні; [1] – 2-5 розділи написані автором особисто; [3] – 1 розділ написаний автором особисто; [17, 40] – інверсний метод визначення коефіцієнів опору потоку повітря пористих матеріалів; [23] – інформаційна модель системи автоматизованого добору звукоізоляційних матеріалів; [20, 42] – модель конвертера експорту геометричних моделей приміщень із системи SketchUp у систему Catt-Acoustic; [19, 57] – удосконалено метод добору коефіцієнтів звукопоглинання акустичних матеріалів; [16, 31] – удосконалено метод найменших квадратів для визначення часу реверберації; [19, 48] – метод векторного імпульсно-частотного зондування; [55] – метод підвищення точності визначення часу реверберації та підсистема пакетного аналізу зареєстрованих аудіофайлів результатів експериментів; [8; 9; 52] –
повітря на здоров'я; [5] – оптимізовано метод визначення спектральних характеристик; [6, 7] – дослідження методів автоматизованого проектування; [10, 11, 33] – постановку задачі; [12] – класифіковано ризики для систем Інтернету речей (ІоТ); [13, 15] – концепцію бази даних шумового забруднення; [14, 29] – аналіз амплітудних характеристик діаграми спрямованості; [21] – дослідив вплив конструктивних особливостей приміщення та його оздоблювальних матеріалів на час реверберації; [24] – програмний код для ANSYS, що реалізує процедуру оптимізації параметрів MEMS-пристроїв; [25] – упорядкування та підготовка даних; [26] – методику використання інформаційних систем; [27] – дослідження рівномірності розподілу звукової енергії в хрестоподібному просторі; [28] – оцінка змісту та коригування наукових висновків; [30] – експерементальне дослідження, калібрування моделі; [32] – структурну модель інтегрованої системи проєктування; [34, 38] – модель визначення звукового тиску у мікрофлюїдному каналі; [35] – запропоновано підхід до розв'язання задачі розсіювання хвиль середовищем із малими включеннями; [36] – оптимізував геометричні характеристики мікроканалів сенсора; [37] – експерементальне долідження рівня шуму; [39, 41] - методику оптимізації автономних енергосистем для моніторингових станцій; [43] – інформаційну модель підсистеми визначення часу реверберації; [44] – методику визначення параметрів звукоізоляції багатошарових композитних балок; [46] – мехатронний стенд та програмне забезпечення для збору та обробки даних; [49] – методологію інтеграції МАТLAB та ANSYS для моделювання мікроелектромеханічних систем; [50] – метод автоматизованого підбору параметрів; [51] – експериментальне дослідження чутливого елемента давача тиску; [53] – метод оптимізації на основі генетичних алгоритмів; [54] – досліджено обмеження існуючих методів реверс-інжинірингу; [56] – експерементальне дослідження рівня шуму; [59] – розроблено підхід до інтеграції САД-систем із хмарною платформою управління; [60] – автоматизовано процес обчислення та візуалізації результатів; [61] – запропоновано методику оптимізації конструкції; [62] – метод автоматизованого проектування; [45, 63, 64] метод розпізнавання рухомих обєктів; [65] – інформаційна модель системи опрацювання звукових даних.

Апробація матеріалів дисертації. Основні результати досліджень, які викладено у дисертації, представлено на таких міжнародних наукових конференціях: XXIX International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED 2024, Tbilisi, Georgia, 2024); XVIII International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH 2022, Polyana, Ukraine, 2022); XVII International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH 2021, Polyana, Ukraine, 2021); XXVII IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2023, Jaroslaw, Poland, 2023); XVI IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2019, Polyana, Ukraine, 2019); XV IEEE International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH 2019, Polyana, Ukraine, 2019); XIV IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2017, Lviv - Polyana, Ukraine, 2017); XII International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH 2016, Lviv - Polyana, Ukraine, 2016); 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018, Lviv - Slavske, Ukraine, 2018); 22nd International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES 2015, Toruń, Poland, 2015); XIII International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2015, Lviv -Polyana, Ukraine, 2015); XI International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH 2015, Lviv - Polyana, Ukraine, 2015); XXIX International Polish-Ukrainian Conference on CAD in Machinery Design. Implementation and Educational Issues (CADMD 2021, Kraków, Poland, 2021); World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium (WMCAUS 2018, Prague, Czech Republic, 2018); XXV Polish-Ukrainian Conference on CAD in Machinery Design-Implementation and Educational Problems (CADMD 2017, Bielsko-Biala, Poland, 2017); VIIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH 2012, Polyana, Ukraine, 2012).

Публікації. У 65 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, зокрема у 7 - монографіях, 17 статтях у наукових фахових виданнях України, 22 статтях у наукових періодичних виданнях інших держав та у виданнях включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 6 статтях у матеріалах конференцій, які індексовані у наукометричних базах даних Scopus та Web of Science, 1 стаття у наукових періодичних виданнях України, що додатково відображають результати дисертаційних досліджень, 12 працях, що опубліковані в збірниках тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел з 350 найменувань та додатків. Робота викладена на 347 сторінках основного тексту, включає 378 рисунків та 22 таблиць.

### **РОЗДІЛ 1**

## СУЧАСНІ МЕТОДИ І МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ АКУСТИЧНОГО ПРОСТОРУ

У цьому розділі виконано огляд сучасних методів та моделей аналізу акустичного простору, зокрема розглянуто питання акустики приміщень [1, 3], in-situ підходів [2], загальних засад акустичних вимірювань [1, 10] та відповідних теоретичних засад щодо ревербераційних характеристик середовища [16]. Також проаналізовано наявні методи моделювання в акустиці [3, 5] та обґрунтовано вибір ключових напрямів дослідження, що лягли в основу структури роботи [1, 2, 3].

Процес розроблення систем акустометрії є комплексним і базується на моделях, методах та засобах дослідження акустичних властивостей приміщень. Комплексність акустометрії обумовлюється широким набором характеристик, за допомогою яких проводять аналіз акустичних властивостей. Їх можна умовно об'єднати в три групи (рис. 1.1).



Рис. 1.1 Основні групи досліджень акустики приміщень

Перша група охоплює частотні властивості, зокрема – амплітудночастотні характеристики (АЧХ), фазо-частотні характеристики (ФЧХ) та низку інших частотних залежностей у вигляді спектрограм (Spectrogram). В англомовній термінології ці характеристики об'єднують поняттям Frequency response (Частотний відгук).

Друга група властивостей, будучи похідною від першої, теж базується на частотних характеристиках, однак, за основу аналізу в цій групі беруть взаємодії властивості комплексної компонентів середовища (звукопоглинаючих матеріалів, профільованих поверхонь розсіювання звукових хвиль, акустичних резонаторів тощо) зі звуковою хвилею. Таку комплексну взаємодію характеризують акустичним імпедансом (Acoustic impedance) з представленням у вигляді комплексних чисел – дійсної (Acoustic resistance) та уявної чи реактивної (Acoustic reactance) складових. Дослідження характеристик цієї групи проводять в спеціалізованих акустичних інструментах, зокрема – імпедансних трубах. В останній період розвитку акустометрії сформувався напрям i відповідний термін – In-situ імпедансометрія, що базується на методах та засобах вимірювання акустичного імпедансу безпосередньо в досліджуваному приміщенні. Сучасний метод In-situ імпедансометрії базується на вимірюванні двох складових звукової хвилі – модуляції тиску в газі (повітрі), що є основою мікрофонних вимірювань, та швидкості мікропотоків газу під час поширення звукової хвилі. Вимірювання цих мікропотоків здійснюється MEMS термоанемометрами. Здебільшого In-situ імпедансометрію проводять за допомогою спеціалізованих P-U зондів звукової інтенсивності (Sound intensity P-U probe).

Третя група досліджень акустики приміщень описує доволі широкий спектр динамічних характеристик поширення хвилі, які теж певною мірою можна вважати похідними першої групи. Однак, акцент тут роблять на динаміці затухання та реверберації (відбиття) звукової хвилі. Основними параметрами третьої групи є тривалість та АЧХ затухання (Decay) звукових хвиль (Waterfall Plot), час реверберації (Reverberation Time, RT60, RT30, RT20), час ранньої реверберації (Early Decay Time, EDT) тощо.

Для оцінки якості акустичних властивостей приміщень використовують параметри розбірності мовлення (Clarity), зокрема індекс передачі мовлення (Speech Transmission Index, STI). В концертних приміщеннях використовують характеристику музичної розбірності (Musical Clarity, C80), що характеризує ранні реверберації в заданому часовому інтервалі, зокрема C80 (інтервал 80 мс).

## 1.1. Акустика приміщень

Проблематика акустики приміщень висвітлена в працях [66–75]. Прикладами науково-практичних задач в цій галузі є: подолання розриву між акустикою приміщень і міською акустикою [76], налаштування акустики багатофункціонального використання приміщення для на музичних майданчиках [77], використання статистичної акустики приміщення для аналізу мереж акустичних датчиків [78], вплив акустики приміщення на відтворення мовного сигналу [79], інтелектуальна та адаптивна акустика в будівлях за допомогою оцінки акустичних параметрів [80], аналіз зсуву частоти для придушення акустичного зворотного зв'язку за допомогою статистичної акустики приміщення [81], сліпий метод оцінки індексу передачі мови в акустиці приміщення на основі концепції модуляційної передавальної функції [82], покращення мовлення в режимі реального часу в шумному ревербераційному середовищі з кількома розмовниками на основі незалежної від місця розташування моделі акустики приміщення [83], дослідження акустики приміщення в аудіовізуальному відстеженні кількох гучномовців [84], оптимальне формування променя як проблема вирівнювання у часовій області із застосуванням до акустики приміщення [85], просторовий активний контроль шуму в приміщеннях з використанням джерел вищого порядку [86], суб'єктивна оцінка впливу характеристик приміщення на розбірливість зашумленої мови [87], веб-аудіосистема в режимі реального часу, що забезпечує 3DoF ауралізацію імітованих акустичних конструкцій приміщень [88], розподілена оцінка та вирівнювання акустики приміщення в бездротовій акустичній сенсорній мережі [89].

## 1.2. Акустичні вимірювання

Проблематика вимірювання параметрів звуку, характеристик джерел звуку та акустики приміщення, в сучасних науково-прикладних публікаціях представлена темами: вимірювання акустичного шуму навколишнього середовища [90], низькочастотні вимірювання в будівельній акустиці [91], конструкція акустичної камери для вимірювання гучномовців [92], проблема невизначеності вимірювань при різних кутах падіння акустичних хвиль на вимірювальний мікрофон [93], вимірювання шуму безпілотних літальних апаратів [94], розробка системи вимірювання слухового апарату [95], дослідження методу вимірювання акустичного поля підводного перетворювача на основі лазерної відбивної томографії [96], дослідження методу вимірювання швидкості потоку вологого газу ультразвуковим витратоміром [97]. експериментальне дослідження високочастотного акустичного вимірювання температури [98], пряме вимірювання швидкості звуку під водою за допомогою системи Dual-Comb та узгодженого алгоритму фільтрації [99], електрична та ультразвукова доплерівська система для промислового вимірювання багатофазного потоку [100], вимірювання швидкості звуку за допомогою методу оцінки фази імпульсного сигналу у воді [101], сила акустичного випромінювання на об'єкт і вимірювання потужності джерела фокусування [102], аналіз похибок вимірювання акустичного тиску в каналі [103], розробка та виготовлення нового датчика для вимірювання високого тиску акустичної хвилі [104], нелінійні акустичні вимірювання непошкоджених та пошкоджених зразків [105], вимірювання енергії слабкого сигналу на акустичних частотах [106].

## 1.3. In-situ акустика

Концепція in-situ діагностики, пов'язаних з звуковими та ультразвуковими вимірюваннями розглядається в публікаціях з тематикою: вимірювання та аналіз параметрів поверхневих хвиль [107]; система перевірки робочого стану слухових апаратів на місці [108]; метод ультразвукової хвилі з повітряним зв'язком для вимірювання напруженомті композитних пластин [109]; кількісна оцінка неглибоких морських археологічних матеріалів за допомогою акустики [110]; розробка глибоководної багатомодової акустичної системи вимірювання відкладень [111]; акустичні вимірювання рівня з реактивною поведінкою планера [112]; часова оцінка швидкості вітру на місці за допомогою підводної пасивної акустики [113]; метод виявлення частинок зносу в мастилі на основі ультразвукового розсіювання [114]; модернізація та дослідження системи акустичного вимірювання опадів [115]; вимірювання нормального коефіцієнта поглинання звуку дорожніх поверхонь [116]; ультразвуковий неруйнівний контроль бетонної конструкції [117]; ультразвукове виявлення каменів у нирках людини методом Допплера [118]; локалізація ультразвуку в резонансних емульсіях [119]; діагностика бетонних конструкцій з неруйнівним контролем [120]; характеристики ультразвукового з'єднання за кімнатної температурі податливого мікровиступу, досліджені вимірюваннями на місці [121]; адаптація фотовикористанням даних сонара, отриманих через сенсор [122]; моніторинг селективного лазерного плавлення на основі гетерогенної інтеграції акустичних сигналів та зображень [123]; оцінка форми пришвартованої групи гідрофонів за допомогою навколишніх сигналів [124]; вимірювання динамічного напруження ультразвукового з'єднання за допомогою п'єзорезистивного датчика [125]; вимірювання деформації ультразвукового з'єднання кульок [126]; вплив підводної акустичної швидкості на локалізацію занурених датчиків [127]; ультразвукові вимірювання перехідних температурних розподілів для точкового зварювання [128]; калібрування решітки сонарів із синтетичною апертурою [129]; спостереження за поведінкою тунця за допомогою пасивних та активних акустичних методів [130]; метод корекції помилки початкового положення автономного підводного апарату поблизу морського дна [131]; неакустична система вимірювання шуму для буксируваної групи гідрофонів [132]; оцінка та компенсація інтенсивності ультразвуку за допомогою двовимірної системи

терапії та зображення з високою частотою кадрів [133]; ультразвукові методи діагностики та лікування пухлин [134].

## Векторні акустичні сенсори

Тематика векторних акустичних сенсорів представлена темами: проєктування та моделювання акустичного векторного датчика [135]; акустичний векторний датчик MEMS з низьким рівнем шуму [136]; акустичний вимірювач імпедансу з векторною корекцією [137]; вимірювання коефіцієнта акустичного відбиття матеріалів за допомогою одновекторного гідрофону [138]; модель імпедансу для швидких вимірювань шуму [139].

## Термічний витратомір ( Thermo Flow Meter)

Розроблення та дослідження термоанемометричних сенсорів потоку газу подано у працях: дослідження датчика потоку газу на основі MEMS для широкого діапазону вимірювань потоку [140]; розробка лічильника газу на основі MEMS термоанемометричних сенсорів [141]; порівняння нових ультразвукових і дротяних термоанемометричних витратомірів газу [142]; система датчика теплового потоку на основі MEMS для високих температур навколишнього середовища [143]; розумний вимірювач газу на основі MEMS для Інтернету речей [144]; проєктування та моделювання мікромашинного мембранного витратоміра [145]; оптимізація положення датчика температури для лічильників газу MEMS [146]; термічний MEMS витратомір зі структурою подвійного нагрівача [147]; нова конструкція двофазного витратоміра з використанням матриці MEMS вимірювачів тиску [148].

## Мультипараметричний аналіз даних

Мультипараметричний аналіз даних викоритовують в апаратурі на основі УЗ (ультразвукових) та МРТ (магнітно-резонансних) методів томографії [149], і зокрема в картографуванні морського дна [150], в дослідженні клітин [151] та широкому спектрі медичної діагностики [152–160]. Розробка методів мультипараметричного аналізу описується в роботах з виявлення порушення рівноваги [161] та якості голосу (індексу дисфонії) [162], моніторингу культури клітин [163], контролю якості природного газу [164] та фермерських угідь [165], дослідження якості полімерних тонких плівок [166], діагностики електростанцій [167], захисту від електромагнітного випромінювання [168]. Використання методів мультипараметричного аналізу в задачах проетування нейронних мереж та машинному навчанні представлено в роботах [169, 170].

## 1.4. Моделювання в акустиці

Проблеми моделювання в акустиці в сучасних публікаціях представлені темами: представлення спрямованого джерела в моделюванні акустики приміщення [171], проєктування системи вимірювання акустики приміщення за допомогою моделювання [172], моделювання складних геометрій і граничних умов у моделюванні акустики кімнати в часовій області [173], метод комплексного зображення для моделювання розсіювання хвиль в акустиці приміщення [174], моделювання акустики приміщення за допомогою MATLAB [175], моделювання акустики приміщення за допомогою MATLAB [175], моделювання акустики приміщення за допомогою 3-D Compact Explicit FDTD Schemes [176], невизначеності моделювання акустики приміщення через дані спрямованості музичних інструментів [177], симуляція акустики приміщення в часовій області кінцевого об'єму за граничних умов загального імпедансу [178], модель реконструкції форми кімнати на основі її акустики [179], мультифізичне моделювання в електровіброакустикці [180].

## SPICE - моделювання сигналів в електронних схемах

Більшість задач моделювання сигналів в електронних схемах та їх компонентах (транзисторах, операційних підсилювачах, аналого-цифрових перетворювачах тощо) базується на стандартизованій програмній платформі SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) [181–184]. На ній реалізовано і постійно розвиваються пакети прикладних програм, зокрема PSPICE (Personal Computer SPICE), LTSPICE (Linear Technology SPICE), MicroCAP (Spectrum Software SPICE) тощо.

На сьогодні характерною є тенденція інтегрування в платформу SPICE моделей неелектричного характеру, а саме, представлення з допомогою існуючих моделей компонентів електронних кіл та електричних процесів в цих колах інших за природою процесів фізичних, хімічних, біологічних тощо [185–189]. Водночас використовують метод формальної аналогії, відповідно до якого різноманітні фізичні процеси, зокрема оптичні перетворення, механічні коливання чи поширення тепла, заміщаються формальними аналогами процесів в електронних колах.

Ефективність формальної аналогії особливо проявляється в задачах модельного дослідження сенсорних та актюаторних пристроїв. Актуальність такого підходу обумовлюється необхідністю проводити комплексні модельні дослідження, як процесів в первинних перетворювачах (механічних, акустичних, оптичних, хімічних, хіміко-біологічних тощо), так і в сигнальних колах керування цими перетворювачами та формування (підсилення, стабілізації, аналого-цифрового перетворення тощо) інформативних сигналів. Характерним прикладом наукових робіт у цьому напрямку є SPICE моделі мемрісторів (Memristor) новітніх компонентів функціональної \_ наноелектроніки [190–194]. Прикладом електроакустичних SPICE моделей є праця [195].

## 1.5. Основні фактори розвитку та структура роботи

Під час аналізу тенденцій розвитку та наукової літератури за тематикою дисертаційної роботи показано роль трьох основних факторів розвитку акустометрії з погляду домінуючого впливу сучасних інформаційних технологій, комп'ютерних наук та методів автоматизованого проєктування засобів дослідження акустики приміщень (рис. 1.2).



Рис. 1.2 Фактори розвитку акустометрії

Першим фактором, що враховує розвиток інформаційних технологій в галузі акустометрії, є широке розповсюдження засобів комп'ютерної техніки в задачах дослідження параметрів оточуючого середовища, сенсорики, людино-машинної взаємодії, зокрема відповідно до концепції повсюдного комп'ютингу UC (Ubiquitous computing), Індустрії 4.0 (Industry 4.0) та Індустріального Інтернету Речей ПоТ (Industrial Internet of Things). Взаємопов'язаними об'єктами досліджень проектів в цих сферах (рис. 1.3) є:

- •промислова автоматизація;
- •розумні пристрої;
- •прогнозоване технічне обслуговування;
- •інтеграція розумних інструментів;
- •програмне забезпечення для оптимізації;
- •підвищена якість;
- •оточуючий менеджмент.



Рис. 1.3 Об'єкти досліджень проектів в концепціях Industry 4.0 та ПоТ

Розвиток акустичної сенсорної техніки в концепції ІоТ представлений темами: функціональна схема модуля на основі ІоТ для мережі акустичних система ІоТ латчиків [196]; для моніторингу акустичного спектру електричного розряду [197]; акустична томографія океану на основі технології NB-IoT [198]; модуль поширення підводного акустичного каналу для моделювання великомасштабних підводних мереж ІоТ [199]; ланцюжок простежуваності для ІоТ акустичних датчиків [200]; взаємодія між пристроями та сервером за допомогою виявлення спотворення акустичного сигналу в програмах ІоТ [201]; повсюдне акустичне зондування на стандартних пристроях Інтернету речей [202]; рішення ІоТ для вимірювання ефективності запилення бджолами [203]; розрізнення типів дронів на основі акустичних допомогою пристроїв IoT [204]; внутрішнього хвиль за система позиціонування на основі обчислювальної архітектури ROOF для додатків ІоТ [205]; сервіс когнітивної акустики для Інтернету речей [206]; акустична сенсорна платформа з підтримкою Інтернету речей для моніторингу шумового забруднення [207]; бездротова система виявлення тріщин на основі ІоТ та акустичної емісії [208]; мультифункціоноальна сенсорна система на основі ІоТ [209]; дослідження розподіленого зондування для ІоТ [210]; акустична система ІоТ для виявлення зниклих безвісти в гірських районах [211]; платформа АІ-ІоТ для оцінки психоакустичного роздратування на межі [212]; приховане підключення пристроїв ІоТ з акустичним шумом [213]; мультимедійна потокова передача через акустичний канал у мережах ІоТ із обмеженнями ресурсів [214]; конструкція резонатора поверхневої акустичної хвилі для сенсорних платформ [215]; повнодуплексний метод акустичного зв'язку для UACN з високим трафіком [216]; механізм управління у мережах підводних акустичних датчиків [217]; система бездротового зв'язку для надійного збору акустичних даних в задачах виявлення аномалій у механічному обладнанні [218]; платформа AI-IoT для оцінки акустичних параметрів приміщення на основі глибоких нейронних мереж [219]; мережа підводних акустичних датчиків: архітектура, виклики, майбутні можливості в перспективі IoT [220];

моделювання продуктивності та енергії для акустичної мережі з низьким рівнем енергії для підводного ІоТ [221]; покращення бездротових сенсорних мереж за допомогою технології акустичного зондування [222]; розподілене комбіноване придушення акустичного вудлуння та зменшення шуму в мережах бездротових акустичних датчиків [223].

Відповідно до цього фактору розвитку акцент робиться на реалізації апаратно-програмних пристроїв, що відповідають критеріям:

•універсальності та надійності функціонування в різноманітних (мало адаптованих) умовах експлуатації за неможливості періодичного налагодження (калібрування);

•обмеженості щодо використання складного (прецизійного, енергозатратного, громісткого тощо) обладнання;

•мініатюрності (Handheld Devices), незначного енергоспоживання при використанні малогабаритних електро-хімічних джерел живлення (акумуляторів), низькій собівартості при масовому автоматизованому виробництві тощо;

•необхідності формувати значні об'єми інформації з врахуванням концепцій злиття даних (Data fusion) та штучного інтелекту AI (Artificial Intelligence).

Другий фактор враховує подальший розвиток наукових підходів інформаційно-вимірювальних технологій, зокрема технології SMART (Self-Monitoring Analysis and Reporting Technology) та концепціяй «розумної» техніки (Smart Tech), «розумного» будинку (Smart Home) тощо (рис. 1.4). В акустометрії цей фактор враховує розвиток напрямку ексклюзивної (State of Art acoustics) та адаптивної (Adaptive acoustics) акустики (рис. 1.5).



Рис. 1.4 Ілюстрація понять SMART та SMART НОМЕ



Рис. 1.5 Ілюстрація понять State of Art and Adaptive Acoustics [224, 225]

Методи та засоби акустометрії повинні відповідати вимогам завадостійкості, селективності та роздільної здатності щодо виявлення збурень АЧХ, обумовлених як частотною залежністю відбивання звукових хвиль від поверхонь досліджуваних приміщень, так і інтерференцією хвиль та їх резонансом. Однак відповідність цим вимогам значною мірою є проблематичною.

Зокрема такою проблематичністю характеризується метод активації звукових хвиль у вигляді білого шуму з подальшою частотною селекцією сигналів поширення цих хвиль у приміщенні на основі вузькосмугових фільтрів, типово зі смугою в октаву (Octave filter) чи в третину октави (1/3-Octave filter). Протиріччям є те, що зі звуженням частотної смуги таких фільтрів зменшується енергія звукових коливань у заданій смузі, а відтак – обмежується якість отримуваної інформації. Це обумовлено зменшенням відношення сигнал-шум, а відтак недостатньою частотною селективністю.

Для прикладу відзначимо необхідність вирішувати проблеми з протиріччям відповідно до вимог адаптивної акустики в концепції ПоТ – або в

досліджуваному приміщенні забезпечувати мінімальні рівні сторонніх шумів та завад (що неможливо в більшості приміщень в присутності людей, працюючого обладнання чи зовнішніх шумів транспорту), або під час досліджень використовувати надто високі рівні активації звукових хвиль (що небезпечно для присутніх та протирічить вимогам мінімального енергоспоживання).

Не меншою проблематичністю характеризується просторова селективність. В більшості методів акустометрії інформативні сигнали є інтегральною характеристикою якості акустики приміщення. Певною мірою ці методи є взаємно відокремленими (незв'язаними). Відтак, виявлення впливу окремих компонентів простору на загальну характеристику додатково потребує використання спеціалізованих методів локальної характеризації, зокрема на основі вимірювання акустичного імпедансу.

I третій фактор, що більшою мірою враховує спеціальність, за якою виконувалася дисертаційна робота, обумовлений подальшим розвитком інформаційних моделей, систем автоматизованого проєктування САПР (САD – Computer Aided Design), програмних засобів синтезу математичних моделей та їх використання, як в проектуванні та дослідженні акустики приміщень, так і формуванні та перетворенні інформативних сигналів акустометрії.

Ці три фактори розвитку обумовили ефективність використання в цій дисертаційній роботі, як з погляду вирішуваної проблеми, так і формулювання конкретних задач наукових досліджень, методу проблемно-орієнтованого проєктування DDD (Domain Driven Design). Спорідненими термінами цього методу є предметно-орієнтоване та концептуальне проєктування (Conceptual Design). Метод DDD орієнтований на комплексне вирішення задач проєктування складних об'єктів з концентрацією основної уваги на предметній області та створенням програмних моделей, які відображують глибоке розуміння предметної області. Ілюстративний витяг щодо впливу концепції ІоТ на проблематику проблемно-орієнтованого проєктування DDD представлено на рис. 1.6.



*Рис. 1.6 Витяг щодо впливу концепції ІоТ на проблематику проблемноорієнтованого проєктування DDD* 

Зокрема, з погляду на вищезгадані фактори розвитку акустометрії, основна увага приділяється не властиво технологіям програмної інженерії в комп'ютерних науках чи технологіям телекомунікацій, зберігання та перетворення інформації в концепції ПоТ, а задачам, що визначають проблематику дослідження акустичних параметрів приміщень. Відповідно до цієї тези та поставлених у дисертаційній роботі задач сформулюємо резюме щодо основних засад акустометрії та їх проблематики.

Наведемо витяг (рис. 1.7) з Інтернет-ресурсу проблемно-орієнтованого проєктування Design With Purpose [226].

Основними тезами цього витягу є:

•акустика змінюється (Acoustic is challenging) у відповідності викликів сьогодення;

•акустика є наукою звуку (Acoustic is the science of sound), а відтак її подальший розвиток передбачає наукових підходів проблемно-орієнтованого проєктування;

•проблематика акустики (в оригіналі Ахіллесова п'ята) не вирішується лише на рівні програмного забезпечення (The Achilles heel of the electronics world is to think that it can fix everything in acoustic with software).



Рис. 1.7 Витяг щодо проблемно-орієнтованого проєктування акустики

Результати наведеного аналізу став основою формування розширеного представлення проблематики акустометрії, основні аспекти якої, зокрема з погляду на САПР та їх комплексні моделі, показано на рис. 1.8.



Рис. 1.8 Діаграма компонентів акустометрії

З урахуванням такого аналізу та узагальнення сучасних тенденцій розвитку методів та засобів дослідження акустичних властивостей з погляду на проблематику інформаційних технологій загалом та зокрема, 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт (паспорт спеціалізації Спец Ради) чи 122 – Комп'ютерні науки, дисертаційна робота представлена наступними взаємопов'язаними етапами досліджень, що охоплюють:

•основні підходи, методи та рішення відповідно до нових тенденцій розвитку акустомкетії;

•електро-акустичні SPICE макромоделі компонентів in-situ та адаптивної акустометрії;

•моделі сигнальних трактів систем акустометрії та синтез програмного симулятора віртуальних сигналів для відладки цих систем;

•метод оптимізації процесу перетворення сигналів за критерієм просторової та частотної селективності;

•методи та апаратно-програмні засоби експериментальних досліджень акустометрії;

•метод верифікації апаратно-програмних засобів акустометрії;

•методи та апаратно-програмні засоби визначення звукопоглинання пористих матеріалів;

•інформаційні моделі систем автоматизованого добору акустичних параметрів та матеріалів;

•апробація основних рішень та характерні приклади дослідження акустики приміщень.

## 1.6. Висновки до розділу 1

Показано роль основних факторів розвитку акустометрії з погляду домінуючого впливу сучасних інформаційних технологій, комп'ютерних наук та методів автоматизованого проєктування засобів дослідження акустики приміщень. По-перше, це широке розповсюдження засобів комп'ютерної техніки в задачах дослідження параметрів оточуючого середовища, сенсорики, людино-машинної взаємодії, зокрема відповідно до концепції повсюдного комп'ютингу UC (Ubiquitous computing) та Індустріального Інтернету Речей ПоТ (Industrial Internet of Things). По-друге, це подальший підходів інформаційно-вимірювальних технологій, розвиток наукових (Self-Monitoring технології SMART Analysis and Reporting зокрема Technology) та концепціяй «розумної» техніки (Smart Tech), «розумного» будинку (Smart Home) тощо. В акустометрії цей фактор враховує розвиток напрямку адаптивної (State of Art) акустики. І, по-третє, з врахуванням спеціальності дисертаційна робота, це подальший розвиток інформаційних моделей, систем автоматизованого проєктування САПР (CAD – Computer Aided Design), програмних засобів синтезу математичних моделей та їх використання, як в проектуванні та дослідженні акустики приміщень, так і формуванні та перетворенні інформативних сигналів акустометрії.

Ці три фактори розвитку обумовили ефективність використання у дисертаційній роботі, як з погляду вирішуваної проблеми, так і формулювання конкретних задач наукових досліджень, методу проблемно-орієнтованого проєктування DDD (Domain Driven Design). Спорідненими термінами цього методу є предметно-орієнтоване та концептуальне проєктування (Conceptual Design). Метод DDD орієнтований на комплексне вирішення задач проєктування складних об'єктів з концентрацією основної уваги на предметній області та створенням програмних моделей, які відображують глибоке розуміння предметної області.

#### **РОЗДІЛ 2**

## ОСНОВНІ ПІДХОДИ, МЕТОДИ ТА РІШЕННЯ

Цей розділ присвячено викладу базових методів, що становлять основу подальших досліджень. Зокрема, тут представлено метод векторного імпульсно-частотного зондування приміщень та метод оптимізації процесу перетворення сигналів, які вперше розроблено автором для підвищення ефективності автоматизованих систем акустометрії [33, 43, 48]. Також наведено постановку задач модельних експериментів і приклади застосування математичних моделей для оцінювання кореляційних та автокореляційних методів частотної селекції сигналів [8, 9, 11, 33].

## 2.1. Метод векторного імпульсно-частотного зондування

Взаємодія напрямів дослідження відповідно до основної концепції дисертаційної роботи представлена на діаграмі рис. 2.1. У дисертаційній роботі пропонується (розроблено) новий метод акустометрії з формулюванням оригінального терміну - *векторне імпульсно-частотне зондування* (векторне IЧЗ - анг. Vector PFS - Pulse-Frequency Sounding).



Рис. 2.1 Взаємодія напрямів дослідження відповідно до основної концепції дисертаційної роботи

Слово «векторне» визначає поняття просторової направленості та відповідає змісту векторних сенсорів (Vector sensors). Словосполучення

«імпусно-частотне» сформульовано щоб: по-перше, таким чином, демонструвати відмінність від вже усталеного в українській мові терміну «частотно-імпульсна модуляція» галузі електронної комунікації (телекомунікації), і по-друге, точніше відтворювати усталений в англійській мові порядок слів «Pulse-Frequency» [227]. У контексті розробленого методу мова йде не про тип модуляції частоти, зокрема в технологіях радіозв'язку, а про процес формування послідовності просторово направлених імпульсів, частота звукових коливань в яких змінюється відповідно до алгоритму вимірювання акустичних параметрів досліджуваного приміщення. І останнє слово цього терміну «зондування» відтворює усталене розуміння процесу проникнення в певне середовище з метою визначення його параметрів. Однак, використання в цьому сенсі англійського слова «Probe» чи його похідної форми «Probing» в акустиці не є типовим. Суттєво кращим у даному контексті є слово «Sounding», що в перекладі Google Dictionary означає «Звучання» [228], а отже максимально точно відображає термін «Sound» (Звук). Відтак, запропонований термін «векторне ІЧЗ» може інтерпретуватися як векторне імпусно-частотне звучання.

Перейдемо до суті та новизни запропонованого методу акустометрії. Метод векторного IЧЗ визначається комбінацією та синергією трьох взаємодоповнюваних науково значимих рішень:

- по-перше, дослідження проводять шляхом збурень зондуючих імпульсів звукових коливань, тривалість та спектр яких оптимізується відповідно до задач та умов експерименту;
- по-друге, формування зондуючих імпульсів в досліджуваному приміщенні відбувається з використанням векторного (селективно-направленого в просторі) активування звукових коливань;
- по-третє, синтез набору інформативних сигналів відбувається шляхом формування імпульсів звукових коливань з заданим відповідно до алгоритму дослідження набору одночастотних коливань, детектування яких здійснюється на основі кореляційних та автокореляційних методів частотної селекції.

Пояснимо сформульоване в першому пункті поняття оптимізації тривалості та спектру зондуючих імпульсів. В рамках запропонованого методу акустометрії така оптимізація є визначальною і базується на наукових методах пошуку (встановлення) компромісу між просторовою та частотною селективністю процесу вимірювання.

Просторова роздільна здатність, як основний параметр не лише запропонованого векторного IЧЗ, але і низки методів просторової локації (зокрема, ультразвукових вимірювачів відстані), визначається методами та засобами вимірювання параметрів ехо-сигналів. Забезпечення високих значень просторової роздільної здатності передбачає можливість високоточної часової селекції відбитих імпульсів звукових коливань - ехосигнал не повинен накладатися на імпульс випромінювання, а отже, очевидною є необхідність мінімізації тривалості зондуючих імпульсів.

Частотна селективність, як основний параметр методів дослідження АЧХ, визначається методами та засобами вимірювання залежності потужності чи амплітуди сигналу від частоти. Забезпечення заданих значень, як і вищезгаданої просторової так і частотної селективності, визначається співвідношенням сигнал-шум вихідного сигналу та передбачає використання методів завадостійкого вимірювального перетворення. Такі методи, і зокрема, з використанням кореляційних чи автокореляційних функціональних перетворень, передбачають збільшення часу інтегрування результатів цих перетворень, а відтак – збільшення тривалості імпульсів звукових коливань.

Досягнення компромісу між просторовою та частотною селективністю процесу вимірювання (їх протиріччям) обумовлює необхідність оптимізації тривалості імпульсів відповідно до умов досліджень та вимог точності вимірювання. Введемо визначення функції оптимізації у вигляді залежності ширина імпульсу W<sub>P</sub> звукових коливань від параметрів процесу формування сигналу:

 $W_P = f(F_0, F_{IF}, \tau, S, S/N, t_{MINR}, [E]), \qquad (2.1)$ 

де: F<sub>0</sub> – частота звукового коливання;

F<sub>IF</sub> – частота паразитної складової інтерференції (завади);

т – характеристичний час встановлення (спаду) звукових коливань;

S – потужність сигналу;

S/N – співвідношення сигнал-шум (Signal-to-Noise Ratio);

t<sub>MINR</sub> – мінімальний час першого інформативного відлуння;

[Е] – матриця параметрів сигнального тракту.

Часові епюри, що відображають процес формування та накладання імпульсів під час їх реверберації в приміщенні представлені на рис. 2.2 та рис. 2.3. Показано, що крім вищезгаданого протиріччя щодо тривалості імпульсів W<sub>P</sub>, процес їх формування визначається також постійною часу т встановлення рівноважного стану коливального процесу (зокрема інерційністю джерел активації звукових коливань). Вихідний сигнал S представлений напругою інтегратора, а стохастичний процес – шумовою складовою N.



Рис. 2.2 Епюри процесу формування сигналів за різної тривалості W<sub>P</sub>



Рис. 2.3 Епюри процесу накладання імпульсів за різної тривалості W<sub>P</sub>

Детальніше параметри функції оптимізації, принцип перетворення сигналів та властивості методу оптимізації тривалості імпульсів W<sub>P</sub> за співвідношенням сигнал-шум SNR (Signal to Noise Ratio) представлено в розділі 5 дисертаційної роботи. Наразі обмежимось лише констатацією положення, що зростання тривалості імпульсу забезпечує підвищення параметру SNR, однак таке зростання призводить до накладання імпульсів під час реверберації відбитих звукових хвиль. Відтак, зростання тривалості імпульсу підвищує завадостійкість та частотну селективність, однак понижує просторову роздільну здатність.

Крім того, важливо зазначити низку часткових рішень, на основі яких базується метод векторного імпусно-частотного зондування. Ці часткові рішення формують опції (не обов'язкові компоненти) реалізації методу векторного ІЧЗ та забезпечують його адаптацію до конкретних задач акустометрії. Проте, певною мірою ці часткові рішення виходять за межі викладення результатів досліджень цієї дисертаційної роботи. На це є дві причини. По-перше, низка таких рішень на цей час перебувають на етапі захисту прав інтелектуальної власності. По-друге, у цій проблематиці працюють учасники колективу, які теж передбачають захист результатів своїх досліджень в дисертаційних роботах. Такими частковими рішеннями є:

- форма огинаючої ІЧЗ адаптується відповідно до динамічних характеристик системи, зокрема гучномовців та мікрофонів;
- інформативною величиною ІЧЗ є комплексні (дійсні RE та уявні ІМ) складові, що вимірюють методом квадратурного детектування;
- вимірювання проводять при фіксованих відстанях між мікрофоном та досліджуваною поверхнею, що дає змогу кількісної оцінки акустичного імпедансу останньої за параметрами ФЧХ;
- випромінювання акустичної хвилі векторного ІЧЗ реалізується суперпозицією просторової направленості та спектру випромінювання;
- вимірювання здійснюють різницевим методом, зокрема з використанням двох чи більше мікрофонів (в тому числі з високою просторовою направленістю діаграми чутливості);
- система ІЧЗ калібрується з використанням поверхонь акустичного поглинання (розсіювання) з заданими імпедансними характеристиками та співставленням результатів багаторазових вимірювань при певному наборі факторів впливу, зокрема різних положеннях рухомої поверхні екранування звукових коливань;
- реалізація системи IЧЗ здійснюється з використанням змішаного перетворення сигналів (Mixed-Signal Front-end) на основі програмованих систем на кристалі PSoC (Programmable System on a Chip).

Варіант реалізації джерела звукової хвилі векторного ІЧЗ, що забезпечує можливість суперпозиції просторової направленості та спектру випромінювання представлено на рис. 2.4. Кожний з гучномовців такого джерела звуку є незалежними в керуванні, а сигнали, що задають звукову хвилю формують генераторами з керованими тривалостями зондуючих імпульсів, частотою та фазою базового коливання  $F_0$  (з можливістю протифазного керування), частотою інтерференції  $F_{IR}$  та параметрами шуму N<sub>s</sub>. Такий набір є корисним, в тому числі, в задачах розроблення, дослідження та відлагодження методів та засобів завадостійкої селекції сигналів.



Рис. 2.4 Джерело векторного ІЧЗ

Варіанти форми огинаючої ІЧЗ, що адаптується відповідно до динамічних характеристик системи вимірювання, і зокрема у вигляді Rectangular, Tukey 0.75, Tukey 0.5, Tukey 0.25, Cosine, Blackman, Flat-top представлені на рис. 2.5.



Рис. 2.5 Варіанти форми огинаючої ІЧЗ

У дослідженнях використали програмний комплекс REW – Room EQ Wizard Room Acoustics Software (вільне для використання - https://www.roomeqwizard.com/). Детальна інформація про основні підходи використання програмного комплексу REW наводяться в наступному підрозділі роботи.

Приклад керування параметрами зондуючих імпульсів відповідно до запропонованого методу векторного ІЧЗ представлено на рис. 2.6. Приклади осцилограм ІЧЗ натурних досліджень з наявністю артефактів, що обумовлені паразитною інтерференцією з електромагнітним випромінюванням силової мережі 50 Гц та накладанням ехо-сигналу з задаючим імпульсом наведені на рис. 2.7, а приклад осцилограми ІЧЗ, отриманої експериментальними дослідженням з адаптованими параметрами та компенсацією вищезгаданих артефактів – на рис. 2.8. Демонструється, зокрема, висока роздільна здатність методу вимірювання (dT = 10 мс) та його інформативність щодо аналізу параметрів ехо-сигналів.



Рис. 2.6 Вікна керуванням параметрами ІЧЗ



Рис. 2.7 Приклади осцилограм ІЧЗ з наявністю артефактів



Puc. 2.8 Приклад осцилограми IY3 з адаптованими параметрами (Windows: Cosine, Cycles = 20)

### 2.2. Формулювання задач модельних досліджень

Розроблення систем акустометрії та їх САПР є комплексним процесом, що включає в себе певну послідовність взаємозв'язаних процесів. Спочатку визначають методи та засоби модельного дослідження сигнальних трактів. Важливо відзначити, що предметами модельних досліджень в цих трактах є електричні та акустичні сигнали. Відтак, формулюється проблема уніфікації методів їх досліджень з синтезом єдиної електро-акустичної моделі.

Ця проблема суттєво розширюється в задачах моделювання акустичного імпедансу, величина якого є інформативним параметром комплексної взаємодії звукової хвилі з об'єктами приміщень, зокрема, розсіювачами та поглиначами звукової енергії, пів- та чверть-хвильовими резонаторами тощо. Сучасним методом дослідження такої взаємодії є вимірювання комплексних значень інтенсивності звуку та акустичного опору на основі MEMS структур - PU Sound Intensity Probe. Вимірювальні перетворювачі цього типу базуються на термоанемометричному методі вимірювання швидкості мікропотоків газу в якому поширюється звукова хвиля.

Відтак, з метою розробки методу модельного дослідження комплексної взаємодії звукової хвилі необхідно вирішити задачу синтезу макромоделі, що

поєднує процеси формування сигналів трьох типів – електричних (процеси в сигнальних трактах), акустичних (процеси поширення та комплексної взаємодії звукових хвиль в об'єкті дослідження) та теплових (процеси переносу теплової енергії в сенсорах мікропотоків газу). Задачу вирішували шляхом подальшого розвитку методу аналогії. Останній дає змогу уніфікувати методологію досліджень та синтезувати єдину макромодель, що поєднує математичний апарат вищезгаданих електричних, акустичних та теплових процесів. Метод аналогії передбачає встановлення еквівалентності за певними ознаками між різними за фізичним принципом механізмами функціонування. Відповідно до цього, у роботі проведено аналіз можливості використання методу аналогій для побудови уніфікованих макромоделей (підрозділ 2.4) та запропоновано новий метод їх синтезу (розділ 3).

Далі виконано комплекс досліджень сигнальних трактів акустометрії (розділ 5). Відповідно до концепції дисертаційної роботи такі дослідження пропонується проводити в три етапи. *Першим етапом* є вибір методів та моделей функціонального аналізу сигнальних трактів. Його результатом є не лише перевірка функціональності запропонованих рішень вимірювальних перетворювачів, але, як про це буде конкретизовано далі, реалізація модельного імітатора (симулятора) сигналів. На *другому етапі* досліджень сигнальних трактів розробляється метод оптимізації процесу вимірювального перетворення за критерієм компромісу між часовою роздільною здатністю та завадостійкістю вимірювання. Метою наступного, *третього*, етапу є синтез та параметричний аналіз схем сигнальних трактів з прив'язкою до конкретних компонентів електронних кіл – підсилювачів, фільтрів, аналого-цифрових перетворювачів тощо. Апробація запропонованих рішень здійснена в концепції програмованих систем на кристалі PSoC (Programmable System on Chip).

Призначенням модельного імітатора сигналів, як це слідує з його назви, є формування масивів даних, на основі яких перевіряють та оптимізують методи подальшого перетворення сигналів, зокрема, швидкого перетворення Фур'є та

частотної селекції з використанням бібліотек математичних перетворень в середовищі MatLab. Діаграма взаємозв'язків (Data Flow Diagram) етапів досліджень та розроблення систем акустометрії з використанням розробленого в рамках даної дисертаційної роботи модельного імітатора сигналів Data@Sim представлена на рис. 2.9.

В основі експериментів (Experiments), результатами яких є дані фізичних досліджень, лежать методи та засоби (Methods & Instrumentations) вимірювальної техніки. Ці дані використовують, як для безпосереднього їх аналізу методами числового перетворення сигналів, зокрема з використанням відповідних функцій MatLAb (MatLAb Data Processing), так і для верифікації та корекції математичних моделей імітатора віртуальних даних. Синтез та використання таких віртуальних даних є критично важливим процесом розроблення методів та засобів акустометрії. Пояснюється це низкою факторів.



Рис. 2.9 Структура процесу дослідження з використанням імітатора сигналів Data@Sim

По-перше, корекція акустики приміщення потребує створення віртуальних акустичних моделей цих приміщень, за допомогою яких не лише підбирають геометрію та компоненти оточуючого середовища, але і визначають оптимальні положення джерел звуку. Створення таких моделей передбачає можливість генерування значної кількості даних, які експериментально отримати неможливо. Обмеженням тут є, як значний об'єм цих даних, так і неможливість в низці задач провести необхідну кількість експериментальних досліджень.

По-друге, під час експериментальних досліджень, особливо в приміщеннях з значним фоновим шумом (Background Noise), має місце значна кількість артефактів. Ідентифікація та компенсація останніх є непростим процесом, що потребує удосконалених методів перетворення сигналів. В свою чергу удосконалених цих методів потребує значної кількості даних – як опорних, з допомогою яких встановлюють початкові умови експерименту, так і даних з присутністю різноманітних паразитних інтерференцій та завад.

І по-третє, синтез значного об'єму віртуальних даних є необхідним з точки зору використання методів нейронних мереж та штучного інтелекту. На даному етапі розвитку комп'ютерних наук використання останніх має значну актуальність. Це передбачає проведення відповідних досліджень в напрямку машинного навчання та відладки відповідних нейронних мереж, а відтак – вимагає генерування значної кількості даних.

сформульовані цій Приймаючи до уваги вище положення, В дисертаційній роботі вирішуються задачі, як подальшого удосконалення САПР акустометрії (CAD & Applications), так і симулятора віртуальних сигналів (Data@Sim). Структура останнього, що відображає потоки даних під синтезу віртуальних сигналів (Data Simulation Flow час Diagram). представлена на рис. 2.10. Симулятор розроблявся з врахуванням переважної більшості фізичних явищ поширення звукових хвиль в приміщеннях.



Рис. 2.10 Структура симулятора віртуальних сигналів Data@Sim

Вхідними параметрами, що визначають синтез даних є:

- набір характеристичних частот звукового діапазону, на яких проводять дослідження Frequency set;
- амплітуда білого шуму, що використовується для активації звукових хвиль в методах проведення частотного аналізу, дослідження затухання та реверберацій – White noise;
- тривалість (характеристичний час) встановлення звукових коливань, що обумовлена інерційністю їх активаторів, зокрема гучномовців - Transition time;
- коефіцієнти затухання звукових хвиль та тривалість процесів їх затухання в просторі Attenuation set;
- амплітуда акустичного та електричного шуму, що реєструється в приймальних трактах системи вимірювання, зокрема в мікрофонах, підсилювачах їх сигналу, аналого-цифрових перетворювачах тощо - BG (Background) Noise;
- інтерференція сигналів, що обумовлена впливом завад, як акустичного (сторонні звуки), так і електричного (електромагнітні завади мереж живлення, силової електроніки, радіочастотного зв'язку тощо) – Interference;

- початковий (мінімальний) рівень та роздільна здатність перетворення сигналів, що обумовлені ефективністю селекції корисних сигналів (придушення шумів та завад), розрядністю аналого-цифрових перетворювачів (16 біт, 24 біт, 32 біт тощо) та коефіцієнтами нормування даних (відповідно до системи числення) - Zero level;
- вибірковість (ширина на нерівномірність смуги частот) цифрових фільтрів чи фільтрів змішаного сигнального фронт-енду Filters set;
- алгоритм та специфікація частотного аналізу інформативного сигналу акустометрії, зокрема методом швидкого перетворення Фур'є - FFT analyzer;
- алгоритм та специфікація методів подальшого перетворення сигналів, зокрема з використанням адаптивної селекції Data processing.

Відповідно до запропонованого методу синтезу віртуальних сигналів зв'язки між даними описують адитивними (+) та мультиплікативними (X) функціями. Так адитивними (+) є дані першої групи - Frequency set та White noise – під час досліджень використовують звукові коливання заданої частоти чи рівномірного розподіленого спектру типу білий шум. В деяких методиках дослідження можливим є також їх сумування. Такими ж адитивними функціями пов'язані дані другої групи - встановлення та затухання акустичних коливань - Transition time та Attenuation set. Натомість взаємозв'язки між вихідними даними першої та другої груп описують мультиплікативними (X) функціями, адже на виході синтезатора дані амплітуди сигналів в імпульсах перемножують на перехідну функцію часу встановлення цих імпульсів. Аналогічними адитивними залежностями характеризують процеси завершального формування віртуальних сигналів - BG Noise, Interference, Zero level, Filters set.

Метод побудови моделі симулятора віртуальних сигналів Data@Sim розглянуто в розділі 5 дисертаційної роботи. Для прикладу, на рис. 2.11 представлено якісну (без оцінки кількісних характеристик) візуалізацію масиву сигналів Data@Sim під час дослідження часу реверберації, а на рис.

2.12 – якісне відтворення АЧХ сигналів Data@Sim в застосунках акустометрії. Кількість та параметри відбитих імпульсів звукових коливань, а також форма АЧХ, в даних прикладах є лише демонстративними.



Рис. 2.11 Приклад візуалізації масиву сигналів Data@Sim nid час дослідження часу реверберації



Рис. 2.12. Приклад АЧХ сигналів Data@Sim в застосунках акустометрії

# 2.3. Математична модель та програмне забезпечення розрахунку ефективності частотної селекції сигналів

З метою дослідження ефективності частотної селекції сигналів акустометрії та виявлення закономірностей такої селекції з врахуванням параметрів перетворення сигналів в рамках даної дисертаційної роботи розроблено математичну модель та програмне забезпечення M-Signal (рис. 2.13 та рис. 2.14).



Рис. 2.13 Основні вікна програмного забезпечення M-Signal



Рис. 2.14 Допоміжні вікна програмного забезпечення M-Signal

Деталізовані модельні дослідження форм сигналів та параметрів перетворення сигналів для вибраного значення частоти F проводять з використанням алгоритму F Single. Частотні характеристики параметрів селекції при скануванні частот в заданому діапазоні досліджують з використанням алгоритму F Sweep.
Модель формування масиву вхідних сигналів S<sub>i</sub> описується виразом

$$S_i = A_S \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F_0 \cdot t + \varphi_S) + A_{IR} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F_{IR} \cdot t) + N_i + A_{DC}, \quad (2.2)$$

де:

- A<sub>S</sub> амплітуда задаючого гармонічного коливання;
- F<sub>0</sub> частота задаючого гармонічного коливання;

*t* – час;

 $\varphi_S$  – фаза;

A<sub>IR</sub> – амплітуда гармонічного коливання інтерференції (завади);

F<sub>IR</sub> – частота гармонічного коливання інтерференції (завади);

N<sub>i</sub> – нормовані значення стохастичної складової (шуму) сигналу;

A<sub>DC</sub> – постійна складова (паразитне зміщення) сигналу.

Модель перетворення сигналів формує значення масивів:

INP – вхідного сигналу;

ABS(INP) – абсолютних значень вхідного сигналу;

INT(INP) – суми абсолютних значень ABS(INP) вхідного сигналу;

Q01(Re) and Q02(Im) – значення кореляційних функцій;

COR – добутку значень сигналу на значення кореляційні функції;

INT(COR) – сума значень добутку COR сигналу.

Параметрами перетворення сигналів є:

N – кількість періодів коливання під час яких формуються масиви даних;

М – довжина масиву даних  $M = \frac{360 \cdot N}{dT}$ ;

Ph – фазова затримка  $\varphi_S$  сигналу;

DC – постійна складова A<sub>DC</sub> (паразитне зміщення) сигналу;

Noise – нормований коефіцієнт амплітудних значень шуму  $N_i$ ;

Fir – частота гармонічної інтерференції *F*<sub>IR</sub> (паразитної завади);

Air – амплітуда гармонічної інтерференції А<sub>IR</sub> (паразитної завади).

Інформативною величиною ефективності частотної селекції є нормовані значення коефіцієнту перетворення сигналу Kn(F/Fir). Частотна селекція реалізується двома методами - Mode A та Mode Q.

В першому з них (Mode A) інформативні сигнали S<sub>A</sub> формуються за виразами:

$$S_A = \sqrt{\left(S_{REA}^2 + S_{IMA}^2\right)};$$
 (2.3)

$$S_{REA} = K_{SA} \sum_{i=1}^{M} (S_i \cdot S_{RE0i}); \qquad (2.4)$$

$$S_{IMA} = K_{SA} \sum_{i=1}^{M} (S_i \cdot S_{IM0i}),$$
 (2.5)

де:

S<sub>REA</sub> та S<sub>IMA</sub> – суми масивів дійсної A(Re) та уявної A(Im) складових сигналів;

 $K_{SA}$  – коефіцієнт перетворення методу Mode A;

М – довжина масиву даних;

*S<sub>RE0i</sub>* та *S<sub>IM0i</sub>* – значення масивів кореляційних функцій

$$S_{RE0} = A_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot F_0 \cdot t); \qquad (2.6)$$

$$S_{IM0} = A_0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot F_0 \cdot t). \tag{2.7}$$

В другому методі (Mode Q) інформативні сигнали S<sub>Q</sub> формуються за виразами:

$$S_Q = \sqrt{(S_{REQ}^2 + S_{IMQ}^2)};$$
 (2.8)

$$S_{REQ} = K_{SQ} \sum_{i=1}^{M} (S_i \cdot A_{RE0i})$$
(2.9)

$$S_{IMQ} = K_{SQ} \sum_{i=1}^{M} (S_i \cdot A_{IM0i})$$
(2.10)

де:

S<sub>REQ</sub> та S<sub>IMQ</sub> – суми масивів дійсної A(Re) та уявної A(Im) складових сигналів;

 $K_{SA}$  – коефіцієнт перетворення методу Mode Q;

А<sub>RE0i</sub> та А<sub>IM0i</sub> – значення масивів знакових (Sign) функцій

$$A_{RE0i} = 1$$
 в інтервалі t =  $[0 \dots \pi];$   
 $A_{RE0i} = -1$  в інтервалі t =  $[\pi \dots 2\pi];$   
 $A_{IM0i} = 1$  в інтервалі t =  $\left[0 \dots \frac{\pi}{2}\right]$  та  $\left[\frac{3\pi}{2} \dots 2\pi\right];$   
 $A_{IM0i} = -1$  в інтервалі t =  $\left[\frac{\pi}{2} \dots \frac{3\pi}{2}\right].$ 

Для прикладу на рис. 2.15 та рис. 2.16 наведені форми сигналів у методах Mode Q та Mode A при Ph = 0 та Ph = 30, а на рис. 2.17 - форми дійсної A(Re) та уявної A(Im) складових сигналів в методі Mode Q при Ph = 0, 30, 90.

Характерні закономірності формування сигналів для декількох прикладів значень N, dT, Ph, Noise, DC (алгоритм F Single) наведені на рис. 2.22 - рис. 2.24. Характерні залежності коефіцієнту частотної селективності Kn від десяткового логарифму нормованих значень частоти Log(F/Rir) (алгоритм F Sweep) для певних параметрів перетворення сигналів наведені на рис. 2.25 - рис. 2.29.



Рис. 2.15 Форми сигналів у методах Mode Q та Mode A для Ph = 0



Рис. 2.16 Форми сигналів у методах Mode Q та Mode A для Ph = 30



Рис. 2.17 Форми дійсної A(Re) та уявної A(Im) складових сигналів в методі Mode Q для Ph = 0, 30, 90



Рис. 2.18 Форми сигналів для: N = 3, Ph = 30, Noise = 0, DC = 0



Рис. 2.19 Форми сигналів для: N = 3, Ph = 30, Noise = 0.5, DC = 0

77



Рис. 2.20 Форми сигналів для: N = 3, Ph = 30, Noise = 0, DC = 0.5



Рис. 2.21 Форми сигналів для: N = 3, Ph = 30, Noise = 0.5, DC = 0.5



Рис. 2.22 Форми сигналів для: N = 30, Ph = 30, Noise = 0.5, DC = 0.5



Рис. 2.23 Форми сигналів для: N = 1, dT = 1, Ph = 30, Noise = 0.5, DC = 0.5



Рис. 2.24 Форми сигналів для: N = 1, dT = 10, Ph = 30, Noise = 0.5, DC = 0.5



Рис. 2.25 Залежності коефіцієнта частотної селективності Кп (набір #1)



Рис. 2.26 Залежності коефіцієнта частотної селективності Кп (набір #2)



Рис. 2.27 Залежності коефіцієнта частотної селективності Кп (набір #3)



Рис. 2.28 Залежності коефіцієнта частотної селективності Кп (набір #4)



Рис. 2.29 Залежності коефіцієнта частотної селективності Кп (набір #5)

Проведення таких модельних досліджень слугує основою вибору методу та параметрів перетворення сигналів відповідно до вимог точності такого перетворення та умов вимірювання акустичних параметрів приміщень.

#### 2.4. Розвиток методу аналогії на основі SPICE макромоделей

Метод аналогії (Analogy Method) [229-231] та один з його різновидів – формальної аналогії [232] широко застосовують для дослідження та формального опису різноманітних фізичних явищ - електричних, механічних, магнітних, теплових, акустичних тощо. Їх використання дає змогу встановити відношення еквівалентності (відповідності, схожості) за деякими ознаками між двома різними за фізичним розумінням системами. Відбувається впровадження методу аналогії в програмну інженерію (Better Software Development Effort Estimation with Analogy-based Approach and Nature-based Algorithms) [233].

Зокрема на рис. 2.30 представлена ілюстрація методу аналогії «акустика електрика», на основі якого електричні параметри використовуються для опису акустичних параметрів - Acoustic pressure (акустичного тиску), Acoustic intensity (акустична інтенсивність), Particle velocity (швидкість частинок), Particle displacement (зміщення частинок) та процесів - Interference (інтерференції), Standing wave (стоячих хвиль), Reflection (відбиття), Absorption (поглинання), Resonance (Резонансу).



Рис. 2.30 Ілюстрація методу аналогії «акустика - електрика»

У цій дисертаційній роботі розвинуто метод формальної аналогії в проблематиці комплексного моделювання електро-акустичних процесів та його використанні в задачах акустометрії [234].

Необхідність використання методу аналогії «акустика - електрика» обумовлена задачами розроблення комплексних моделей засобів акустики та перетворення сигналів вбудованих систем акустометрії. Різноманіття цих засобів вимірювальних та перетворення сигналів. зокрема схем перетворювачів фронт-енду (Analog Front-end, AFE) та аналогового інформаційно-комп'ютерних акустики, обумовлює проблему систем уніфікації платформи, на якій проводять комплексні модельні дослідження.

На даний час більшість задач автоматизованого проєктування та моделювання сигналів в електронних схемах та процесів в їх компонентах (транзисторах, операційних підсилювачах, аналого-цифрових перетворювачах тощо) базується на стандартизованій програмній платформі SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) [181]. На цій платформі реалізовано і постійно розвиваються пакети прикладних програм, зокрема PSPICE (Personal Computer SPICE), LTSPICE (Linear Technology SPICE), QSPICE (Qorvo), MicroCAP (Spectrum Software SPICE), Proteus (Labcenter Electronics) тощо (рис. 2.31).

ELECTRONIC SIMULATOR PROTEUS 8.13				
Component Windows Options A Analog Primitives	Passive Components		Blocks	•
Analog Library	<ul> <li>Active Devices</li> </ul>		Comparators and Opamps	•
Digital Primitives	Waveform Sources		DIACs, PUTs, TRIACs and SCRs	
Digital Library	<ul> <li>Function Sources</li> </ul>		Dividers and Multipliers	
Animation	Laplace Sources		Diffentiators and Integrators	
Find Component Ctrl+Shi	ft+F Z Transform Sources Dependent Sources		Filters Miscellaneous	:
1 S (V-Switch)	Macros	,	Monostables	
2 Noise	Subckts		Motors	
3 Resistor	R Connectors		Photo Diodes	Photodiode_R
4 Ground	G SMPS		Potentiometers	Photodiode
5 Battery	B Special Purpose		Relays	•
6 Capacitor	C N-Port		Summers	*
7 Current Source	I Modulators		VCOs	
8 NFV	F IBIS		Limiters	• C • • •
9 Voltage Source	V Switched Capacitor	,		
10 Amp	Stability			

Рис. 2.31 Ілюстрація методу аналогії «акустика - електрика»

Більшість компаній, що розробляють та виготовляють електронні компоненти, поставляють адаптовані та верифіковані SPICE моделі цих компонентів. Зокрема це моделі мікрофонів компанії Texas Instruments - PSPICE-FOR-TI: PSpice model of microphone [235], моделі гучномовців LTSpice Model – Loudspeaker [236], аудіо підсилювачів Class-D audio amplifier [237] (рис. 2.32).

\*\* Released by: Analog eLab Design Center, Texas Instruments Itrans.sim - Notepad \* Part: TPA2034D1 File Edit Format View Help Date: 12/21/2010 @OrCAD Simulation Server Versi Model Type: PSPICE @Settings: 0 1 Simulator: PSPICE @General: Simulator Version: 16.2.0.p001 ProfileName= "trans" ProfileFile= "trans.sim" EVM Order Number: N/A Connectivity= "SCHEMATIC1.net" \* EVM Users Guide: N/A . . . . . . . . . . . . . . . . . . \* TPA2034D1 subckt \*s .SUBCKT TPA2034D1 PVDD IN+ IN- SHUTDOWN GND VO+ VO-\$CDNENCSTART . eee8c5c7a2bc4b01f045f303678664e7916da0bae22e8cb0bba041dd67c69ce448ea70148a9ac1670c8926c1ac5057c8ccfcd77bf87ca9dc516 f413ba645a02fc7799193bd3a63d4502765acc4ae5d413e00df65f92497ba1a95e7065ad1c7f22c8e8d976846557a49be8d24b699ca0c69e17a 6bfb5d61ac69ca8fd04e197d04f58eb2843e2ea86fe3924622b546a7b1f5c1eb8a77a280a8910ada2bd315d19a8ba6565c0c35cf1e1809853fe 8548215614db6af3f337f9cf88319bf4ba88d3d07a1195db99c93d006d4d8fbd95bd0cbe3e1a872d0893a601ae8421bf96b910cd1c09412d073 0ab3eab7d19021d238a404c16153b5a1f108233fcb17b853cd721e9994f6fd2fa1e1dc19e0e6f22f9d7018c4fc4b941cb7667770b3331683429 d1eef0ba38bb4038cc03afee2436f09bd19dc3da354ada841fbfbaec5e7f21a65a22a623dd103e073748dc36eaea0bade8240a4c667e939bdad \$CDNENCFINISH ENDS TPA2034D1

Рис. 2.32 Фрагмент опису SPICE моделі TPA2034D1

Основними методами модельного аналізу в SPICE є: Transient Analysis – часовий аналіз та дослідження перехідних характеристик; AC Analysis – аналіз по змінному струму та дослідження частотних характеристик; DC Analysis – аналіз по постійному струму та дослідження прохідних характеристик.

У наш час стає характерною тенденція інтегрування в платформу SPICE моделей неелектричного характеру, а саме, представлення з допомогою існуючих моделей компонентів електронних схем фізичних, хімічних та біологічних об'єктів. При цьому використовують метод формальної аналогії, відповідно до якого різноманітні фізичні процеси, зокрема оптичні перетворення, механічні коливання чи поширення тепла, заміщаються формальними аналогами процесів в електронних колах. Ефективність формальної аналогії особливо проявляється в задачах модельного дослідження сенсорних та актюаторних пристроїв. Характерним прикладом наукових робіт у цьому напрямку є SPICE модель мемрісторів (Memristor) – новітніх компонентів функціональної наноелектроніки [238].

Використання методу формальної аналогії передбачає синтез SPICE макромоделей (Macro Model). Їх приклад, зокрема макромодель фотодіода,

демонструється на нижній ілюстрації рис. 2.31 (Analog -> Macros -> Photo Diodes). Розроблення таких SPICE макромоделей (Macros, рис. 2.31) можливість дослідження засобів забезпечує комплексного взаємодії електронних пристроїв з оточуючим фізичним середовищем, використовуючи вищезгадані Transient, AC та DC методи модельного аналізу. Під поняттям комплексності розуміється можливість поєднувати модельне дослідження явищ оточуючого середовища з процесами формування та вторинного перетворення електричних сигналів. В цьому контексті особливо актуальною є проблематика моделювання та автоматизованого проєктування акустичних мікроелектромеханічних MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) пристроїв [36, 51, 53, 60].

Відповідно до зазначеного раніше у дисертаційній роботі вирішуються задачі розроблення SPICE макромоделей систем автоматизованого проєктування засобів акустики. Об'єктами та процесами досліджень у цих задачах (рис. 2.33) є:

- випромінювачі акустичних хвиль, зокрема, електроакустичний перетворювач (Electroacoustic Transducer) гучномовець (Loudspeaker, LS);
- вимірювачі акустичних хвиль, зокрема, мікрофон (Microphone, MC);
- комплексні вимірювачі акустичного імпедансу, основою яких є вимірювальні перетворювачі тиску (P-Probe) та швидкості потоку (U-Probe) повітря;
- поширення та відбиття звукових коливань в просторі, зокрема, з врахуванням дійсної (Re) та уявної (Im) складових акустичного імпедансу;
- формування та вимірювальне перетворення сигналів, зокрема, схем їх генерування, підсилення, аналогового та цифрового перетворення тощо.



Рис. 2.33 Ілюстрація задач розроблення SPICE макромоделей систем автоматизованого проєктування засобів акустики

Задачі розроблення прикладних математичних моделей електроакустичних пристроїв висвітлені в численних наукових публікаціях, зокрема: розроблення, аналіз та моделювання ємнісних MEMS мікрофонів для інтегрування в CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) інтегральні схеми [239], нова методологія розроблення та 3D (3 - Dimension) моделювання смарт систем мікрофонів [240], моделі фільтрів та покращення параметрів систем на основі матриці мікрофонів [241], моделі діаграм направленості сферичної матриці мікрофонів у приміщенні [242], моделі акустичнотемпературного шуму в ємнісних MEMS мікрофонах [243].

Проблематика SPICE моделювання акустичних компонентів охоплює задачі: SPICE моделі мікрофонів на основі нейронних мереж [244], SPICE моделі п'єзоелектричних керамічних ультразвукових перетворювачів [245], SPICE моделі п'єзоелектричних полімерів [246], двополюсна схема заміщення та SPICE моделі акустичних хвилеводів (acoustic horns) [247], моделювання п'єзоелектричних та акустичних компонентів в пакеті прикладних програм LTspice\SwCad [248]. Прикладом дисертаційної роботи в цій проблематиці є [249]. Практичні проблеми побудови та використання SPICE моделей електро-акустичних перетворювачів, зокрема, гучномовців (Loudspeaker) та їх акустичних систем представлені в [249-252].

У рамках виконання даної дисертаційної роботи проблематика розроблення SPICE макромоделей Acoustic-Electric Macro Models (рис. 2.34) передбачає вирішення комплексу задач, що охоплюють:

- функціональний аналіз та синтез (Functional analysis and synthesis);
- модельний синтез сигналів (Model signal synthesis);
- схемно-параметричний аналіз (Schematic and parametric analysis);
- параметричну оптимізацію (Parametric optimization);
- структурно-схемну верифікацію (Schematic verification);
- схемний синтез вбудованих систем (Synthesis of embedded systems).
  - Функціональний аналіз та синтез
  - ✓ Модельний синтез сигналів
  - ✓ Схемно-параметричний аналіз
  - ✓ Параметрична оптимізація
  - ✓ Структурно-схемна верифікація
  - ✓ Синтез вбудованих систем



#### Рис. 2.34 Призначення SPICE макромоделей

Розкриті в подальших підрозділах дисертації нові рішення та етапи розроблення SPICE моделей для САПР електронних засобів акустики використовують низку спеціальних методів. Спершу розглянемо метод імпедансометрії, зокрема, розрахунку та інтерпретації імпедансних характеристик. У ньому результат розрахунку представляють у вигляді імпедансних діаграм Найквіста, що передбачає перехід від амплітудночастотних та фазо-частотних характеристик (діаграм Боде) до відображення активної та реактивної складових імпедансу на комплексній площині [253]. Використання діаграм Найквіста підвищує ефективність інтерпретації результату вимірювання чи моделювання.

На відміну від діаграм Боде діаграми Найквіста не містять безпосередніх значень частоти. При цьому комплексне число імпедансу  $\hat{Z}(\omega)$  для заданої частоти  $\omega$  зображається точкою на комплексній площині {Re $\hat{Z}$ ; Im $\hat{Z}$ }. Зі зміною частоти така точка описує годограф імпедансу. Суть методу

імпедансного аналізу полягає в якісній та кількісній оцінці форми годографа, за якою інтерпретують структуру досліджуваного двополюсника.

Зокрема, реактивний двополюсник на основі паралельного RC контуру – описується повним імпедансом

$$\hat{Z} = \frac{R}{1 + j\omega RC}.$$
(2.11)

Використовуючи комплексну форму  $\hat{Z} = Z' + jZ''$ , визначають активну Re $\hat{Z}$  (дійсну) та реактивну Im $\hat{Z}$  (уявну) складові імпедансу:

$$\operatorname{Re}\hat{Z} = Z'(\omega) = \frac{R}{1 + (\omega RC)^{2}}; \quad \operatorname{Im}\hat{Z} = Z''(\omega) = -\frac{\omega R^{2}C}{1 + (\omega RC)^{2}}. \quad (2.12)$$

Повний модуль імпедансу такого елементарного двополюсника та зсув фази між струмом та напругою в ньому визначаються виразами

$$Z = \sqrt{\left(Z'\right)^2 + \left(Z''\right)^2} = \frac{R}{\sqrt{1 + \left(\omega RC\right)^2}}, \qquad \phi = \operatorname{arctg} \frac{Z''}{Z'} = -\operatorname{arctg}(\omega RC)$$
(2.13)

У низці сучасних версій пакетів програм схемного моделювання, зокрема, вищезгаданого пакету MicroCAP (Spectrum Software SPICE), вже передбачено метод імпедансного аналізу з використанням математичних функцій дійсних Re та уявних Im складових сигналу. З допомогою цих функцій можна побудувати діаграму Найквіста та розрахувати відповідні значення активного Re $\hat{Z}$  та реактивного Im $\hat{Z}$  імпедансу.

Для прикладу розглянемо послідовність синтезу схеми заміщення SPICE моделі та візуалізації її амплітудно-частотних (АЧХ), фазо-частотних (ФЧХ) та імпедансних характеристик у вигляді діаграм Найквіста. Схема містить джерело вхідної напруги змінного струму (AC, Alternative current) Vinp, перетворювач напруга-струм G1 та реактивну ланку з двох R1C1, R2C2 колах, імпедансні характеристики якої у вузлі (3) є предметом модельних досліджень (рис. 2.35).



Рис. 2.35 Схема заміщення SPICE моделі та специфікація AC Analysis

Специфікація AC Analysis визначає наступні характеристики: db(V(3)) та ph(V(3)) - A4X (у децибелах) та  $\Phi4X$  (у градусах) (рис. 2.36); Re(V(3)) та Im(V(3)) - 4actothi xapaktepuctuku diйchoï Re ta уявної Im складових імпедансу (рис. 2.37); сімейство діаграм Найквіста Im = f(Re) (рис. 2.38). Представлені сімейства діаграм відповідають трьом значенням ємності C1 = 1E-9, 1E-8, 1E-7. Інформативною величиною результатів досліджень в такому методі є не лише частотна залежність активної та реактивної складових імпедансу, але і форма діаграм Найквіста. Саме за аналізом форм діаграм на комплексній площині проводять інтерпретацію фізичних процесі, що відбувається в об'єкті досліджень.



Рис. 2.36 Сімейство АЧХ та ФЧХ



Рис. 2.37 Сімейство частотних характеристик активної Re та реактивної

## Іт складових імпедансу



Рис. 2.38 Сімейство діаграм Найквіста

Іншим методом, що використовується у цій дисертації для побудови моделей САПР електронних засобів акустики, є вищезгадана формальна аналогія. Розглянемо цей метод на прикладі побудови моделей теплової релаксації з використанням реактивних електронних кіл, зокрема пасивних RC ланок [254].

Прийнявши в першому наближенні незалежність коефіцієнту теплопровідності від температури, систему рівнянь теплового потоку можна записати у вигляді:

$$\begin{cases} -dT/dx = P/\lambda S \\ d^{2}T/dx^{2} = \frac{j\omega c \rho T}{\lambda}, \end{cases}$$
(2.14)

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності; S – площа ізотермічної поверхні; P – тепловий потік; c – питома теплоємність;  $\rho$  – питома густина речовини.

Натомість, систему рівнянь, яка характеризує пасивну *RC* ланку з розподіленими параметрами при встановленому режимі, можна записати у вигляді

$$\begin{cases} -\frac{dV}{dx} = R_i I \\ \frac{d^2V}{dx^2} = j\omega R_i C_i V \end{cases},$$
(2.15)

де *V*, *I* – комплексні амплітуди напруги та струму; *R<sub>i</sub>*, *C<sub>i</sub>* – опір та ємність на одиницю довжини лінії.

Порівнюючи ці дві системи рівнянь можна встановити формальну аналогію між тепловими та електричними величинами: кількість тепла в тепловій моделі відповідає електричному заряду в електричній моделі; різниця температур – різниці потенціалів; тепловий потік – електричному струму; густина теплового потоку – густині струму; тепловий опір – електричному опору; коефіцієнт теплопровідності – питомій електричній провідності; теплоємність – електричній ємності. Просторові та часові параметри обох моделей є ідентичними. Відтак, можна реалізувати SPICE моделей на основі методу електро-теплової аналогії.

Для прикладу на рис. 2.39 наведено перехідний процес в двох R1C1, R2C3 ланках при її живленні імпульним джерелом струму G1, що може використовуватися в SPICE моделі елетро-теплової аналогії.



Рис. 2.39 Перехідні процеси в RC ланках в SPICE моделях елетро-теплової аналогії

У цьому прикладі струм джерела G1 можна використовувати як формальний аналог теплового потоку, а падіння напруги в RC ланках – аналогом різниці температур під час теплової релаксації структур нагрівника. Залежно від складності структури з тепловою релаксацією та точності розрахунку використовують декілька ланок. Зокрема, для структур інтегральної електроніки, такими ланками електротеплової моделі є: активна ділянка виділення тепла – кристал структури; кристал – прокладка (клей); прокладка – корпус; корпус – радіатор; радіатор – оточуюче середовище.

Як розвиток методів вищезгаданих методів імпедансометрії та формальної аналогії в подальших частинах дисертації представлено нові рішення до синтезу схем заміщення SPICE моделей випромінювачів та вимірювачів акустичних хвиль, науковою новизною яких є інтегрування в моделі електричних, механічних, акустичних та теплових процесів. Зокрема, новизною цих рішень є інтегрована модель комплексних вимірювачів акустичного імпедансу, основою яких є вимірювальні перетворювачі тиску (P-Probe) та швидкості потоку (U-Probe) повітря.

Розглянемо можливості використання SPICE моделей для представлення процесів поширення звукових хвиль. Так, у сучасних версіях MicroCAP реалізовані моделі трансмісійних ліній типу TLine (Transmission Line). Параметрами SPICE моделі цих ліній є: характеристичний імпеданс Z0

(Characteristic impedance), час затримки TD (Transmission delay), відносне значення довжини хвиль NL (Relative wavelength) та їх частота F (Frequency), питомий (на одиницю довжини) омічний опір R (Per unit length resistance), індуктивність L (Per unit length inductance), ємність C (Per unit length capacitance), провідність G (Per unit length conductance) та довжина LEN (Physical length) ліній (рис. 2.40).

Характерні приклади побудови та використання схем заміщення процесів поширення хвиль з використанням SPICE моделей трансмісійних ліній типу TLine для певних наборів параметрів кола навантаження наведено на рис. 2.41 (Transient Analysis) та рис. 2.42 (AC Analysis).

ι∰ TLine:Transmission Line - Ideal or Lossy				
Value Value Show				
Display Display Shape Border Display Border Display Shape Border Display Fill				
PART=TimeL1 TimeL1 MODEL=TS COST= POWER= SHAPEGROUP=Default PACKAGE=	Transmission lines Schematic format: PART attribute: <name> This attribute defines the part name. Examples: T1</name>			
OK Cancel Font Add Delete Browse	Tlin2			
New         Find         Plot         Syntax         IBIS         Help           Image: The constraint of the constrai	VALUE attribute: ideal: Z0= <value> [TD=<value>]   [F=<value>[NL=<value>]] lossy: [<physical length="">]   LEN=<value> R=<value> L=<value> G=<value></value></value></value></value></physical></value></value></value></value>			
Source: Local page 'Models'           C         undefined           L         undefined           L         undefined           R         undefined           TD         100m	C= <value> This attribute defines the transmission line parameters. Parameters for the \ attribute take precedence over model parameters. With no model statement LEN parameter should be used instead of <physical length="">. Examples: Z0=75 TD=15N</physical></value>			

Рис. 2.40 Специфікація SPICE моделі трансмісійних ліній типу TLine



Рис. 2.41 Приклад Transient Analysis SPICE моделі TLine



Рис. 2.42 Приклад AC Analysis SPICE моделі TLine

У дисертаційній роботі представлено подальший розвиток принципів побудови SPICE моделей передачі акустичних хвиль, які на відміну від вищенаведених макромоделей трансмісійних ліній типу TLine забезпечують можливість точнішого представлення процесів акустики приміщень.

Зокрема, відмінністю та науковою новизною запропонованих рішень є представлення та специфікація параметрів ефектів багаторазового відбиття акустичних хвиль від поверхонь та накладання цих хвиль з урахуванням параметрів, як задаючого сигналу, так і імпедансу звукопоглинаючих матеріалів. У розвиток методу імпедансометрії запропоновані рішення розглядаються як основа аналізу процесів накладання акустичних хвиль з врахуванням параметрів задаючого сигналу, затримки поширення хвиль в просторі та імпедансу поверхонь відбивання.

Основними компонентами схем заміщення таких SPICE макромоделей (рис. 2.43) є лінії затримки ΔT DELAY MACRO (рис. 2.44), підсилювачі (повторювачі, атенюатори) К сигналів та RLC реактивні кола, що специфікують імпеданс поверхонь відбивання.



Рис. 2.43 Формальна аналогія в SPICE моделях розповсюдження акустичних хвиль в просторі приміщень

Спершу, розглянемо закономірності впливу часу затримки поширення хвиль у просторі на сигнали, що використовуються для розрахунку акустичного імпедансу. Для цього синтезуємо схему заміщення (рис. 2.45), що містить задаючий сигнал – джерело напруги Vi, перетворювач напруга-струм Gi, елементарне реактивне R1C1 коло, лінію затримки X1 (ΔT). Вихідний сигнал в такому дослідженні – напруга у вузлі V(3) формується на резисторі R2. Отримані для трьох варіантів специфікації параметрів схеми заміщення діаграми Найквіста представлені на рис. 2.46 - рис. 2.48.







Рис. 2.45 Приклад моделювання Re ma Im складових акустичного імпедансу на вході (V(2)) та виході (V(3)) лінії затримки



Рис. 2.46 Діаграма Найквіста на вході (зверху) та виході (знизу) лінії

затримки (С1 = 1Е-6)



Рис. 2.47 Діаграма Найквіста на вході (зверху) та виході (знизу) лінії затримки (C1 = 1E-7)



Рис. 2.48 Діаграма Найквіста на вході (зверху) та виході (знизу) лінії затримки (C1 = 1E-8)

У цих варіантах змінювалися параметри реактивного R1C1 кола, а саме ємність конденсатора C1 = 1E-6, 1E-7, 1E-8. Відтак, модельними експериментами виявлено, що зменшення ємності цього конденсатора (зменшення реактивної складової акустичного імпедансу на вході лінії затримки) призводить до збільшення «заповненості спіралі» діаграми Найквіста на виході лінії затримки. Як слідує з рис. 2.49 та рис. 2.50, виявлений ефект пояснюється інтенсивністю осциляцій Re та Im складових акустичного імпедансу на виході лінії затримки.



Рис. 2.49 Приклад моделювання Re ma Im складових акустичного імпедансу на вході (V(2)) та виході (V(3)) лінії затримки (C1 = 1E-7)



Рис. 2.50 Приклад моделювання Re ma Im складових акустичного імпедансу на вході (V(2)) та виході (V(3)) лінії затримки (C1 = 1E-8)

Підсумовуючи вищенаведені результати зробимо висновок, що коректне використання в SPICE моделях ліній затримок, що описують часові характеристики поширення акустичних коливань у просторі, повинно передбачати детальний аналіз частотної залежності Re та Im складових акустичного імпедансу, а відтак їх вплив на отримувані діаграми Найквіста.

На наступному етапі синтезу схем заміщення акустичних SPICE моделей розглянемо ефект відбивання та інтерференції акустичних хвиль. Крім уже розглянутих ліній затримок, такі схеми заміщення містять компоненти зворотного зв'язку, які реалізують з використанням повторювачів чи атенюаторів (підсилювачів з коефіцієнтом підсилення K < 1). Як це показано на рис. 2.51, елементарна схема, що представляє один тракт зворотного зв'язку, містить один атенюатор X2, зокрема з коефіцієнтом загасання K = 0.5. Відбивання хвиль аналізують у вузлі (5), а інтерференцію – у вузлі (2). Компоненти Rimp та Cimp формують елементарне коло акустичного імпедансу поверхні відбиття. Співвідношення опорів резистора кола зворотного зв'язку Rfb та резистора вхідного кола Rinp визначають параметри ефекту реверберації. Як і в раніше наведених схемах заміщення, кількість каналів зворотного зв'язку може бути довільною та визначається точністю (складністю) моделі.



Рис. 2.51 Елементарна (одноланкова) схема заміщення процесу відбивання хвиль та їх інтерференції

Приклади результатів модельних досліджень такої SPICE моделі представлені на:

- рис. 2.52 ефект реверберації без врахування акустичного імпедансу поверхні відбиття;
- рис. 2.53 ефект реверберації з врахуванням акустичного імпедансу поверхні відбиття;
- рис. 2.54 ефект реверберації затухаючих коливань;
- рис. 2.55 сигналів для побудови фігур Ліссажу акустичних сигналів;
- рис. 2.56 фігури Ліссажу акустичних сигналів;
- рис. 2.57 АЧХ та ФЧХ з врахуванням ефекту реверберації;
- рис. 2.58 Re та Im складові акустичного імпедансу та діаграма Найквіста з врахуванням ефекту реверберації.



Рис. 2.52 Приклад модельних досліджень ефекту реверберації без врахування акустичного імпедансу поверхні відбиття



Рис. 2.53 Приклад модельних досліджень ефекту реверберації з врахуванням

## акустичного імпедансу поверхні відбиття



Рис. 2.54 Приклад модельних досліджень ефекту реверберації затухаючих



Рис. 2.55 Приклад результатів модельних досліджень сигналів для побудови фігур Ліссажу



Рис. 2.56 Приклад результатів модельних досліджень з використанням фігур



Рис. 2.57 Приклад моделювання АЧХ та ФЧХ з врахуванням ефекту



Рис. 2.58 Приклад моделювання Re ma Im складових акустичного імпедансу (зверху) та діаграма Найквіста (знизу) з врахуванням ефекту реверберації

# 2.5. Математична модель середовищ із заданими акустичними характеристиками

Класична теорія акустичного розсіювання присвячена дослідженню просторово-часової поведінки фізичних змінних, які описують хвильові явища, викликані заданими джерелами. У випадку лінійного поширення методологія опису значною мірою не залежить від природи поля і її можна застосовувати до акустичних, електромагнітних, плазмових та інших полів. У даному підрозділі розглянуто основи теорії акустичного розсіювання. Методологія і позначення відповідають концепції, які викладені у монографіях [3, 255]. Наведені дані є теоретичною базою для побудови багатьох моделей, які описують процеси акустичного випромінювання.

Нев'язке вільне від зарядів (джерел) середовище з густиною  $n_0m$  і статичним ізотропним тиском  $p_0$  дає можливість згенерувати однорідні або неоднорідні коливання, здатні підтримувати акустичні явища. У лінійному режимі акустичне поле описується малими амплітудними змінами тиску  $p=p(\mathbf{r},t)$  і швидкістю  $\mathbf{v}=\mathbf{v}(\mathbf{r},t)$  відповідно до хвильових рівнянь Ейлера [256]:

$$\frac{1}{\gamma p_0} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{v} = -s,$$

$$\nabla p + n_0 m \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\mathbf{f}.$$
(2.1)

Праві частини (функції збудження  $s = s(\mathbf{r}, t)$  і  $\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{r}, t)$ ) представляють собою скалярне точкове джерело і зумовлений цим джерелом вектор густини напружень;  $\gamma$  – характерна питома теплоємність середовища, а  $\nabla$  – просторовий оператор градієнта. Поля тиску та швидкості однозначно визначаються рівняннями (2.1) якщо поставити на збудження вимогу  $s = 0 = \mathbf{f}$  для  $t \leq t_1$ , а на поля початкову

$$p=0=\mathbf{v}$$
 для  $t \le t_1$  (2.1a)

і граничну

$$p = \alpha \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \quad \text{Ha} \quad S \tag{2.16}$$

умови. Одиничний вектор **n** – нормаль до поверхні *S* (якщо така існує), яка обмежує об'єм, для якого застосовні рівняння (2.1),  $\alpha$  – параметр, який характеризує форму границі.

Помноживши обидва рівняння (2.1) на p і **v** відповідно і додавши результат, ми отримаємо закон збереження енергії:

$$\nabla \cdot p\mathbf{v} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2\gamma p_0} p^2 + \frac{n_0 m}{2} \mathbf{v}^2\right) - sp - \mathbf{f} \cdot \mathbf{v} .$$
(2.2)

Вектор pv ідентифікується як миттєвий потік акустичної потужності на одиницю площі в точці **r** і в момент часу t, а члени в дужках – як загальна накопичена густина енергії. Величини –*sp* і –**f** · **v** представляють енергію, що постачається на одиницю об'єму при **r**, t існуючим джерелом та густиною зусиль відповідно.

Для однорідних середовищ можна отримати систему рівнянь другого порядку, яка є наслідком рівняння (2.1) при виключенні функцій **v** або *p*. Для простоти ми опустимо члени збудження і тим самим отримаємо однорідні (хвильові) рівняння

$$\nabla^2 p - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p = 0, \qquad (2.3a)$$

$$\nabla \nabla \cdot \mathbf{v} - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{v} = 0, \qquad (2.36)$$

де  $a = (\gamma p_0 / n_0 m)^{1/2} = (\gamma \kappa T_0 / m)^{1/2}$  – акустична (теплова) швидкість,  $T_0$  – фонова температура (оточуючого середовища),  $\kappa$  – постійна Больцмана. Наявність доданків, що відповідають за джерела, призводить до очевидної модифікації рівнянь (2.3). «Поздовжній» характер акустичного поля проявляється за дії оператора дивергенції ( $\nabla \cdot$ ) і ротора ( $\nabla \times$ ) на рівняння (2.36). Таким чином, очевидно, що у випадку, коли відсутні джерела, функція  $\nabla \cdot \mathbf{v}$  задовольняє хвильове рівняння того ж вигляду, що і рівняння. (2.3a); значення ротора  $\nabla \times \mathbf{v}$ залишаються сталими в часі і фактично дорівнюють нулю в згідно з рівнянням (2.1a), якщо поле швидкостей обмежене. Це є умовою того, що під час поширення окремої плоскої хвилі єдина компонента поля швидкостей, що не зникає, знаходиться вздовж напрямку поширення (тобто хвиля є «поздовжньою»).

Розв'язок задач поширення просторово однорідного акустичного поля може базуватися на рівняннях першого або другого порядку. Перевагою останніх є те, що оскільки акустичне поле в основному скалярне, опис поля можна здійснити в термінах однієї скалярної функції, якою може бути тиск, потенціал швидкості тощо. Тим не менш, ми будемо використовувати процедуру, яка базується на системі рівнянь першого порядку (2.1), оскільки це має очевидні переваги:

а) представлення акустичного поля простими залежностями від збуджень s і **f**;

б) можливість застосування як до однорідних, так і неоднорідних середовищ;

в) можливість використання загального математичного формулювання, для всіх задач розсіювання.

Лінійність рівнянь (2.1) означає, що тиск і швидкість в будь-якій точці простору-часу  $\mathbf{r}$ , *t* можуть бути виражені через збудження *S* і **f** як

$$p(\mathbf{r},t) = -\int G_{11}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')s(\mathbf{r},\mathbf{r}')d\mathbf{r}'dt' - \int G_{12}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')\cdot\mathbf{f}(\mathbf{r},\mathbf{r}')d\mathbf{r}'dt',$$
  

$$\mathbf{v}(\mathbf{r},t) = -\int G_{21}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')s(\mathbf{r},\mathbf{r}')d\mathbf{r}'dt' - \int \Gamma_{22}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')\cdot\mathbf{f}(\mathbf{r},\mathbf{r}')d\mathbf{r}'dt',$$
(2.4)

де  $d\mathbf{r}'dt'$  – диференціальний елемент об'єму простору-часу, а інтегрування відбувається по області, де збудження не зникають. З рівняння (2.4) можна ідентифікувати  $G_{11}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')$  і  $\mathbf{G}_{21}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')$  як скалярну та векторну функцію Гріна, що представляє, відповідно, «від'ємне» значення тиску та швидкості при  $\mathbf{r}$ , t завдяки дії «одиничного» джерела в середовищі при  $\mathbf{r}'$ , t'. Аналогічно,  $\mathbf{G}_{21}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')$  і  $\Gamma_{22}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')$  ідентифікуються як векторна та дуальна (dyadic) функції Гріна, які представляють (коли векторний добуток множиться справа на одиничний вектор  $\mathbf{e}'$ ) тиск і швидкість, відповідно, при  $\mathbf{r}$ , t, що виникають завдяки «одиничному» вектору густини зусиль, який діє в напрямку  $\mathbf{e}'$  при  $\mathbf{r}'$ ,  $\dot{t}$ .

Представлення поля формулою (2.4) зводить задачу розв'язування системи рівнянь (2.1) до визначення чотирьох акустичних функцій Гріна  $G_{11}$ ,  $G_{21}$ ,  $G_{12}$ , і  $\Gamma_{22}$ . Основною перевагою цього представлення є те, що при розв'язанні задачі розсіювання для функцій Гріна усуваються складності, пов'язані з функціональною формою збуджень  $s(\mathbf{r},t)$  і  $\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{r},t)$ . Щоб отримати рівняння для визначення функцій Гріна, потрібно підставити подання (2.4) у рівняння (2.1), звідки, з огляду на довільність збуджень *s* і **f**, отримуємо

$$\frac{1}{\gamma p_{0}} \frac{\partial}{\partial t} G_{11} + \nabla \cdot \mathbf{G}_{21} = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \delta(t - t'), \frac{1}{\gamma p_{0}} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{G}_{12} + \nabla \cdot \Gamma_{22},$$

$$\nabla G_{11} + n_{0} m \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{G}_{21} = 0, \nabla \mathbf{G}_{12} + n_{0} m \frac{\partial}{\partial t} \Gamma_{22} = \mathbf{1} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \delta(t - t'),$$
(2.5)

з урахуванням граничних і початкових умов

$$G_{11} = \alpha \mathbf{n} \cdot \mathbf{G}_{21} \text{ Ha } S, \ \mathbf{G}_{12} = \alpha n \cdot \Gamma_{22} \text{ Ha } S, \qquad (2.5a)$$

$$G_{11} \equiv 0 \equiv \mathbf{G}_{21} \text{ при } t \leq t', \ \mathbf{G}_{12} \equiv 0 \equiv \Gamma_{22} \text{ при } t \leq t',$$
(2.56)

де **n** – вектор зовнішньої нормалі на поверхнях *S* (якщо такі є), які обмежують область, всередині якої визначено поле. У рівнянні (2.5) символом "**1**" позначено одиничний вектор-тензор (dyadic), який визначається співвідношенням  $\mathbf{1} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{1} = \mathbf{A}$ , де  $\mathbf{A}$  – довільний вектор.

Оскільки форма граничних умов (2.5а) може ускладнити визначення акустичних функцій Гріна, часто буває бажано ввести інші функції Гріна, які задаються простішими граничними умовами, а саме  $G_{11} \equiv 0 \equiv \mathbf{G}_{21}$  на  $S \cdot \mathcal{Y}$  цьому випадку для обмежених областей представлення (2.4) необхідно узагальнити шляхом додавання поверхневих інтегральних членів, що виникають за наявності сингулярних джерел на граничній поверхні S.

Виключивши  $\mathbf{G}_{21}$  і  $\mathbf{G}_{12}$  з рівнянь (2.5) для однорідного середовища отримаємо диференціальні рівняння в частинних похідних другого порядку, що визначають скалярну  $G_{11}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')$  і дуальну  $\Gamma_{22}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')$  функції Гріна

$$(\nabla^{2} - \frac{1}{a^{2}} \frac{\partial^{2}}{\partial t^{2}})G_{11} = -n_{0}m \frac{\partial}{\partial t}\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')\delta(t - t'), \qquad (2.6a)$$

$$(\nabla \nabla - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{1}) \cdot \Gamma_{22} = n_0 m = -\frac{1}{\gamma p_0} \frac{\partial}{\partial t} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \delta(t - t') \mathbf{1}.$$
(2.66)

Якщо функції Гріна, визначені у рівняннях (2.6), відомі, то з використанням формул (2.5),  $\mathbf{G}_{21}$  і  $\mathbf{G}_{12}$  визначаються інтегруванням по часовій змінній.

Цікаво дослідити властивості акустичних функцій Гріна, які можна вивести для явного розв'язання рівнянь (2.5). Наприклад, інваріантність рівнянь (2.5) стосовно довільних лінійних (координатних) переміщень у просторі та часі дає можливість зробити висновок, що в необмеженій однорідній області розв'язками системи (2.5) є функції від різниці аргументів  $\mathbf{r} - \mathbf{r}'$  і t - t', тобто

$$G_{ij}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t') = G_{ij}(\mathbf{r} - \mathbf{r}', t - t'), \qquad (2.6B)$$

де індекси *i*, *j* = 1,2 розрізняють скалярні, векторні та дуальні функції Гріна.

Додаткові властивості акустичних функцій Гріна можна отримати, пов'язавши розв'язки рівнянь (2.1) з розв'язками «приєднаної» задачі. З цією метою приєднані рівняння, а також граничні та початкові умови вибираються таким чином, щоб встановити співвідношення взаємності для системи (2.1) між початковим і приєднаним полями. Рівняння для приєднаних полів для тиску  $p^+ = p^+(\mathbf{r}, t)$  і швидкості  $\mathbf{v}^+ = \mathbf{v}^+(\mathbf{r}, t)$  випливають із вихідних рівнянь (2.1) при застосуванні перестановки  $\partial / \partial t \rightarrow -\partial / \partial t$  і  $\nabla \rightarrow -\nabla$ 

$$-\frac{1}{\gamma p_{0}}\frac{\partial}{\partial t}p^{+} - \nabla \cdot \mathbf{v}^{+} = -s^{+},$$
  
$$-\nabla p^{+} - n_{0}m\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{v}^{+} = -\mathbf{f}^{+},$$
  
(2.7)

а граничні та початкові умови мають вигляд

$$p^+ = -\alpha \mathbf{n} \cdot \mathbf{v}^+ \text{ Ha } S , \qquad (2.7a)$$

$$p^+ = 0 = \mathbf{v}^+$$
 при  $t \ge t_2$ , (2.76)

які демонструють просторову і часову подібність стосовно збудження  $s^+ = s^+(\mathbf{r},t)$  і  $\mathbf{f}^+ = \mathbf{f}^+(\mathbf{r},t)$ , що спадають при  $t \ge t_2$ . Приєднані рівняння (2.7) відрізняються від вихідних рівнянь акустичного поля (2.1) тим, що вони «повернуті в часі», мають різні збудження і дають розв'язки для хвиль, які «приходять», а не «відходять». Відхідні розв'язки мають функціональну форму  $F(|\mathbf{r}|+at)$  і можуть перетворюватися в нуль при  $t > t_2$ , тоді як прихідні розв'язки мають вигляд  $F(|\mathbf{r}|-at)$  і можуть перетворюватися в нуль при  $t < t_1$ .

Шляхом відповідного множення рівнянь (2.1) на  $p^+$  і  $v^+$ , а рівнянь (2.7) на p і V і додавання отриманих рівнянь отримуємо «відношення взаємності»

$$\nabla \cdot (p\mathbf{v}^{+} + p^{+}\mathbf{v}) + \frac{1}{\gamma p_{0}} \frac{\partial}{\partial t} (pp^{+}) + n_{0}m \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}^{+}) = ps^{+} - p^{+}s - \mathbf{f} \cdot \mathbf{v}^{+} + \mathbf{f}^{+} \cdot \mathbf{v}$$
(2.8)

між розв'язками вихідного і приєднаного рівнянь. Якщо проінтегрувати рівняння (2.8) у просторово-часовій області, яка обмежена просторовою поверхнею S і часовою змінною  $t_1, t_2 > t_1$ , використати теорему про дивергенцію, а також граничні і початкові умови (2.1а), (2.1б) і (2.7а), (2.7б), то ми отримаємо інтегральну форму відношення взаємності:

$$0 = \iiint d\mathbf{r} \int_{t_1}^{t_2} dt [ps^+ - p^+ s - \mathbf{f} \cdot \mathbf{v}^+ + \mathbf{f}^+ \cdot \mathbf{v}].$$
(2.9)

Лінійність приєднаних рівнянь (2.7) означає, що приєднане поле (розв'язки) можна виразити через приєднані функції Гріна подібно до рівнянь (2.4):

$$p^{+}(\mathbf{r},t) = -\int G_{11}^{+}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')s^{+}(\mathbf{r},\mathbf{r}')d\mathbf{r}'dt' - \int G_{12}^{+}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')\cdot\mathbf{f}^{+}(\mathbf{r},\mathbf{r}')d\mathbf{r}'dt',$$
  

$$\mathbf{v}^{+}(\mathbf{r},t) = -\int G_{21}^{+}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')s(\mathbf{r},\mathbf{r}')d\mathbf{r}'dt' - \int \Gamma_{22}^{+}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')\cdot\mathbf{f}^{+}(\mathbf{r},\mathbf{r}')d\mathbf{r}'dt',$$
(2.10)
де приєднані функції Гріна  $G_{ij}^{*}$ , позначені верхнім індексом "+", відіграють ту ж роль у приєднаному полі, що й функції Гріна в вихідному полі. Визначальні рівняння для приєднаних функцій Гріна випливають з рівнянь (2.7) шляхом інвертування вихідних рівнянь (2.5) і (2.6) для функції Гріна разом з граничними та початковими умовами, у спосіб, зазначений у рівняннях (2.7).

Відношення взаємності (2.9) забезпечує зв'язок між полями p, **V**, збудженими джерелами S і **f** та приєднаними полями  $p^+$ ,  $v^+$ , збудженими джерелами  $s^+$  і **f**<sup>+</sup>. Якщо вибрати різні збудження у формі «точкове джерело»,

$$s = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')\delta(t - t'), s^{+} = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}'')\delta(t - t''),$$
$$\mathbf{f} = 0, \mathbf{f}^{+} = 0,$$

тоді з рівнянь (2.4) і (2.10) отримаємо відповідні розв'язки задачі розсіювання

$$p = -G_{11}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t'), p^{+} = -G_{11}^{+}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'', t, t''),$$
$$\mathbf{v} = -\mathbf{G}_{21}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t'), \mathbf{v}^{+} = -\mathbf{G}_{21}^{+}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'', t, t''),$$

і, отже, можна зробити висновок з рівняння (2.9) що

$$G_{11}(\mathbf{r}^{"},\mathbf{r}^{'},t^{"},t^{'}) = G_{11}^{+}(\mathbf{r}^{'},\mathbf{r}^{"},t^{'},t^{"}).$$
(2.11a)

Подібним чином, точкове джерело збудження можна вибрати як

$$s = 0, s^{+} = 0,$$
  
$$\mathbf{f} = \mathbf{e}' \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \delta(t - t'), \mathbf{f}^{+} = \mathbf{e}'' \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}'') \delta(t - t'')$$

де e' i e" – одиничні вектори, що характеризують напрямки густин точкових зусиль в точках r' i r". Оскільки, з рівнянь (2.4) і (2.10) отримуємо

.

$$p = -\mathbf{G}_{12}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t') \cdot \mathbf{e}', \ p^{+} = -\mathbf{G}_{12}^{+}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'', t, t') \cdot \mathbf{e}''$$
$$\mathbf{v} = -\Gamma_{22}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t') \cdot \mathbf{e}', \ \mathbf{v}^{+} = -\Gamma_{22}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'', t, t''),$$

то можна вивести з рівняння (2.9) що

$$\mathbf{e}' \cdot \Gamma_{22}(\mathbf{r}', \mathbf{r}'', t', t'') \cdot \mathbf{e}'' = \mathbf{e}'' \cdot \Gamma_{22}^{+}(\mathbf{r}'', \mathbf{r}', t'', t'') \cdot \mathbf{e}',$$
  

$$\dot{\Gamma}_{22}(\mathbf{r}', \mathbf{r}'', t', t'') = \dot{\Gamma}_{22}^{+}(\mathbf{r}'', \mathbf{r}', t'', t''),$$
(2.116)

де  $\dot{\Gamma}_{22}$  – функція, транспонована до  $\Gamma_{22}$ . Друге рівняння в (2.116) випливає з першого з умови того, що скаляр дорівнює йому транспонованому і що

$$s = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')\delta(t - t'), \mathbf{f}^+ = \mathbf{e}^{"}\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}^{"})\delta(t - t''),$$

або

$$\mathbf{f} = \mathbf{e}' \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}'') \delta(t - t''), s^+ = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}'') \delta(t - t'')$$

ми отримаємо

$$\mathbf{G}_{21}(\mathbf{r}^{"},\mathbf{r}^{'},t^{"},t^{'}) = \mathbf{G}_{12}^{+}(\mathbf{r}^{'},\mathbf{r}^{"},t^{'},t^{"}), \qquad (2.11\mathrm{B})$$

$$\mathbf{G}_{12}(\mathbf{r}^{"},\mathbf{r}^{'},t^{"},t^{'}) = \mathbf{G}_{21}^{+}(\mathbf{r}^{'},\mathbf{r}^{"},t^{'},t^{"}). \qquad (2.11r)$$

Інші властивості взаємності акустичних функцій Гріна випливають з порівняння рівнянь (2.1) і (2.7), тобто приєднані функції Гріна відповідають зворотному часові, а також, як наслідок просторового відображення, мають зворотні компоненти швидкості:

$$G_{ij}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t') = (-1)^{i+j} G_{ij}(\mathbf{r},\mathbf{r}',-t,-t'), \qquad (2.12a)$$

звідки, з співвідношень (11а)-(11d), можна знайти

$$\dot{G}_{ij}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t') = (-1)^{i+j} G_{ij}(\mathbf{r},\mathbf{r}',-t,-t')$$
 (2.126)

з тими ж позначеннями, що й у формулі (2.6в). Відношення взаємності у формі рівнянь (2.12) можуть бути застосовні до загального класу задач акустичного розсіювання як в однорідних, так і в неоднорідних середовищах, і часто спрощують отримання явних формул для акустичних функцій Гріна.

Як можна зробити висновок з рівнянь (2.6) і (2.5), або, як це можна перевірити шляхом прямої підстановки в рівняння (2.5), всі шукані акустичні функції Гріна в однорідному середовищі можна виразити з допомогою однієї скалярної функції Гріна  $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t')$  таким чином:

$$G_{ij}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t') = n_0 m \frac{\partial}{\partial t} g(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t'),$$
  

$$\Gamma_{22}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t') = \left(\frac{1}{\gamma p_0} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\nabla \times \nabla \times \mathbf{1}}{n_0 m (\partial / \partial t)}\right) g(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t'), \qquad (2.13a)$$
  

$$\mathbf{G}_{21}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t') = -\nabla g(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t') = \mathbf{G}_{12}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t'),$$

де  $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t')$  задовольняє хвильове рівняння

$$(\nabla^2 - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2})g(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t') = -\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')\delta(t - t')$$
(2.136)

і граничні та початкові умови відповідно до (2.5а) та (2.5б). Здатність виражати всі чотири акустичні функції Гріна в термінах однієї скалярної функції є загальним наслідком скалярної природи акустичного поля, але ця властивість не виконується для загальних векторних полів. З огляду на властивості взаємності (2.12б) акустичних функцій Гріна для однорідного та незмінного в часі середовища з рівняння (2.13а) випливає, що

$$g(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t') = g(\mathbf{r}, \mathbf{r}', -t', -t),$$
 (2.13b)

і навпаки, очевидно, якщо рівняння (2.13в) задовольняється, то виконуються співвідношення (2.12б).

# Скалярна функція Гріна для необмеженого простору

Для необмеженої однорідної області скалярна функція Гріна g має властивість (2.6в), тобто  $g(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t') = g(\mathbf{r}-\mathbf{r}',t-t')$ , а отже її визначальне рівняння (2.13б) зводиться до

$$(\nabla^2 - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2})g(\mathbf{r}, t) = -\delta(\mathbf{r})\delta(t), \qquad (2.14)$$

де для простоти ми обрали  $\mathbf{r}' = 0 = t'$ . Розв'язок рівняння (2.14) задовольняє початкові умови (умови причинності) прямування до нуля для  $t \le 0$  (або, що еквівалентно, умові для хвилі, яка відходить).

$$g(\mathbf{r},t) = \frac{\delta(t - (r/a))}{4\pi r}, r = |\mathbf{r}|.$$
(2.15a)

Цей розв'язок можна отримати, розглянувши сферу радіуса r, об'єм V і поверхню S з центром при r = 0, звідки з теореми дивергенції випливає, що

$$\iiint_{V} \nabla \cdot \nabla g dV = \iint_{S} \frac{\partial g}{\partial r} dS = 4\pi r^{2} \frac{\partial g}{\partial r},$$

і також

$$\iiint_V g dV \to 0$$
при  $\mathbf{r} \to 0$ 

Зі сферичної симетрії рівняння (2.14) при інтегруванні по об'єму в околі точки **r** = 0 можна отримати

$$4\pi r^2 \frac{\partial g}{\partial r}\Big|_{r\to 0} = -\delta(t).$$

Оскільки загальний (сферично-симетричний) розв'язок рівняння (2.14), який задовольняє умову вихідного випромінювання, має функціональний вигляд  $g(\mathbf{r},t) = F(t - (r / a)) / r$ , то звідси слідує рівняння (2.15а), яке ми запишемо як

$$g(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t') = \frac{\delta(t-t'-(|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|/a))}{4\pi |\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}, \qquad (2.156)$$

звідки при підстановці в рівняння (2.13а), можна отримати різні функції Гріна для необмеженого однорідного середовища.

Якщо точкове джерело  $s(\mathbf{r},t)$  при  $\mathbf{r}' = 0$  має залежну від часу амплітуду, задану як s(t) для  $t \ge 0$ , то відповідне (потенціальне) поле  $\varphi(\mathbf{r},t)$  можна отримати з рівняння (2.15б) шляхом множення на s(t') та інтегрування по t' в межах t' = 0 і t' = t - r / a. З результату

$$\varphi(\mathbf{r},t) = \frac{s(t-r/a)}{4\pi r} U(t-r/a), \qquad (2.15B)$$

де U(x) – кусочно-постійна функція, яка дорівнює 1 для  $\tau > 0$  і 0 для  $\tau < 0$ , слідує, що залежність поля від часу при r така ж, як і у джерела, але

 $\tau = \frac{r}{a}$ , необхідний для поширення поля від джерела до г. Крім того, вимога причинно-наслідкового зв'язку  $\varphi = 0$  для t < 0 виглядає строгіше ніж умова  $\varphi \equiv 0$  для t < r/a (тобто перша реакція при г спостерігається в момент часу  $\tau$  після ініціації збудження).

Для обмеженої області скалярну функцію Гріна *g* не можна виразити так просто, як у рівнянні (2.156), але вона може бути представлена в термінах відповідних власних функцій області.

#### Поширення плоских хвиль

Отримати розв'язки для залежних від простору та часу полів, які збуджуються довільними просторово-часовими розподіленими акустичними джерелами, як правило, неможливо. Хоча перелік формальних розв'язків таких задач може бути отриманий за допомогою операторного або еквівалентних методів, їх явний розв'язок часто вимагає складного процесу інтегрування, залежно від просторово-часового розподілу джерел. Знаходження розв'язків задач акустичного розсіювання для джерел у вільному просторі для гармонічної форми плоскої хвилі може бути набагато простішим, оскільки операторний аналіз стає по суті алгебраїчним.

Таким чином, у відповідних областях, якщо розподіл джерел можна розділити на їх складові плоских хвиль, відповідну реакцію поля, як правило, можна визначити за допомогою алгебраїчних методів і бажані просторовочасові поля оцінюють шляхом синтезу (інтегрування) відповідних складових плоских хвиль. Цей аналіз і процедура синтезу забезпечують ефективну методологію для розрахунку потоку потужності та асимптотичної оцінки дальніх полів, які є лінійними. Далі увага буде зосереджена на аналізі процесу розсіювання плоскими хвилями та їх функціях Гріна, просторові і залежні від часу поля яких отримуються за допомогою відповідних перетворень.

## Представлення з використанням функції Гріна

Як зазначено в попередньому підрозділі, акустичні поля, збуджені в лінійних однорідних областях, виражаються через скалярну функцію Гріна, яка є розв'язком рівняння

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) g(\mathbf{r}, \mathbf{r}', t, t') = -\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')\delta(t - t')$$
(2.16)

з урахуванням початкової умови  $g \equiv 0$  для t < t'. У випадку необмеженої області це є вірним для заданого t завдяки обмеженій швидкості поширення a та граничній умові  $g \equiv 0$  при  $|\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \rightarrow \infty$  (див. рівняння (2.15в)). З огляду на

властивість лінійності поля і загального представлення функції Гріна, з рівняння (2.16) можна отримати простий розв'язок у частотній області

$$g(\mathbf{k},\omega) = \frac{1}{k^2 - (\omega^2 / a^2)}, \text{ Im } \omega > 0,$$
 (2.17a)

де обмеження Im  $\omega > 0$  забезпечує в цій області аналітичність  $g(\mathbf{k}, \omega)$ , відповідно до природи функції Гріна. Щоб продовжити аргумент  $\lambda$  на дійсну вісь  $\omega$  (в межах Im  $\omega \to 0 +$ ), спочатку слід зауважити, що дійсна сингулярна функція, така як 1 / x, невизначена при x = 0, може бути подана однозначно за допомогою наступного представлення:

$$\frac{1}{x} = \lim_{x \to 0^+} \frac{1}{x - i\varepsilon} = \lim_{\varepsilon \to 0} \left( \frac{x}{x^2 + \varepsilon^2} + i\frac{\varepsilon}{x^2 + \varepsilon^2} \right) = P\frac{1}{x} + \pi i\delta(x), \quad (2.176)$$

де *P* позначає «головну частину» і використовується у сенсі Коші для виключення сингулярної точки x = 0. Рівняння (2.17б) слід інтерпретувати як «розподіл», якому надається звичайне значення при множенні на відповідну функцію від x та інтегруванні по x [2]. Відповідно до рівняння (2.17б),  $g(\mathbf{k}, \omega)$  продовжується як

$$g(\mathbf{k},\omega) = P \frac{1}{k^2 - (\omega^2 / a^2)} + \pi i \delta\left(k^2 - \frac{\omega^2}{a^2}\right), \text{ Im } \omega = 0.$$
 (2.17b)

Якщо ми знаємо амплітуду  $g(\mathbf{k}, \omega)$ , це дає змогу оцінити функцію Гріна, яка залежить від простору та часу, як

$$g(\mathbf{r},t) = \begin{cases} \int \frac{e^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t)}}{k^2 - (\omega^2 / a^2)} \frac{dkd\omega}{(2\pi)^4} = \frac{\delta(t - (r / a))}{4\pi r}, t > 0, \\ 0, t \le 0, \end{cases}$$
(2.18)

де для простоти **r**,*t* у рівняннях. (2.18) позначають **r** – **r**' і *t* – *t*', і де результат інтегрування відомий з альтернативної оцінки в рівнянні (1.15а). Слід зазначити, що полюсні особливості підінтегрального виразу в рівнянні (2.17б), або еквівалентно в  $g(\mathbf{k},\omega)$ , мають місце при тих значеннях  $\mathbf{k},\omega$ , які задовольняють «дисперсійному рівнянню»  $k^2 - (\omega^2 / a^2) = 0$  і «резонансному» відношенню.

Різні акустичні функції Гріна  $G_{11}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')$ ,  $G_{22}(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')$  тощо є похідними від  $g(\mathbf{r},\mathbf{r}',t,t')$ , як зазначено раніше в рівняннях. (2.13а). З цих рівнянь разом з рівняннями. (2.4) і (2.17в) легко випливає, що в спряженому просторі  $\mathbf{k}, \omega$ акустичні функції Гріна мають вигляд (для Im  $\omega = 0$ ),

$$G_{11}(\mathbf{k},\omega) = \pi \omega n_0 m \delta \left( k^2 - \frac{\omega^2}{a^2} \right) + P \frac{1}{i(\omega / \gamma p_0) + (k^2 / i\omega n_0 m)},$$

$$\tilde{G}_{22}(\mathbf{k},\omega) = \left[ \pi \frac{\omega}{\gamma p_0} \delta \left( k^2 - \frac{\omega^2}{a^2} \right) + P \frac{1}{i(\omega / \gamma p_0) + (k^2 / i\omega n_0 m)} \right] \mathbf{i}_L + \frac{1}{i\omega n_0 m} \mathbf{i}^T,$$

$$(2.19)$$

$$G_{12}(\mathbf{k},\omega) = G_{21}(\mathbf{k},\omega) = i \mathbf{k} \left[ -\pi i \delta \left( k^2 - \frac{\omega^2}{a^2} \right) + P \frac{1}{k^2 - (\omega^2 / a^2)} \right],$$

де дельта-функції та основні значення символу P повинні бути опущені, коли  $\operatorname{Im} \omega \neq 0$ . Одиничні вектори-тензори  $\mathbf{i}_{L}$  та  $\mathbf{i}^{T}$  визначаються як

$$\mathbf{i}_{L} = \frac{\mathbf{k} \times \mathbf{k}}{k^{2}}, \ \mathbf{i}^{T} = \frac{-\mathbf{k} \times (\mathbf{k} \times \mathbf{1})}{k^{2}}, \ \mathbf{1} = \mathbf{i}^{L} + \mathbf{i}^{T},$$
 (2.19a)

які є поздовжніми і поперечними відповідно до напрямку  $\mathbf{k}_0 = \mathbf{k} / k$  поширення плоскої хвилі. Значення цих перетворених функцій Гріна посилюється, якщо спочатку переписати рівняння акустичного поля (2.1) у спряженому просторі як

$$i\frac{\omega}{\gamma p_0} p(\mathbf{k},\omega) - i\mathbf{k} \cdot \mathbf{v}(\mathbf{k},\omega) = -s(\mathbf{k},\omega),$$

$$ikp(\mathbf{k},\omega) + i\omega n_0 m \mathbf{v}(\mathbf{k},\omega) = -\mathbf{f}(\mathbf{k},\omega),$$
(2.20)

звідки їх алгебраїчний розв'язок можна виразити в термінах перетворених акустичних функцій Гріна в рівняннях (2.19) як

$$p(\mathbf{k},\omega) = -G_{11}(\mathbf{k},\omega)s(\mathbf{k},\omega) - G_{12}(\mathbf{k},\omega)\mathbf{f}(\mathbf{k},\omega),$$
  

$$\mathbf{v}(\mathbf{k},\omega) = -G_{21}(\mathbf{k},\omega)s(\mathbf{k},\omega) - \tilde{G}_{22}(\mathbf{k},\omega)\mathbf{f}(\mathbf{k},\omega).$$
(2.21)

Те, що рівняння (2.21) справді є розв'язком рівнянь (2.20) у необмеженому просторі, можна перевірити шляхом прямого обернення рівнянь (2.20), що вже очевидно з рівнянь (2.14) і (2.16).

Об'єднана схема рівнянь акустичного поля в спряженому просторі  $\mathbf{k}$ ,  $\omega$  надає наочне уявлення про взаємозв'язки між невідомими акустичними функціями, а також може використовуватися для розрахунку властивостей дисперсії і потужності випромінювання. Якщо ввести векторну систему координат  $\mathbf{k}_0, \mathbf{T}'_0, \mathbf{T}'_0, = \mathbf{k}_0 \times \mathbf{T}'_0$ , показану на рис. 2.59, то векторні поля можна розділити на поздовжню (*L*) і поперечну (*T*) компоненти як

$$\mathbf{v}(\mathbf{k},\omega) = v_L \mathbf{k}_0 + v_{T'} \mathbf{T}_0' + v_{T''} \mathbf{T}_0'',$$
  
$$\mathbf{f}(\mathbf{k},\omega) = f_L \mathbf{k}_0 + f_{T'} \mathbf{T}_0' + f_{T''} \mathbf{T}_0'',$$

звідки рівняння (2.20) можна розділити на поздовжні рівняння,

$$i\frac{\omega}{\gamma p_0}\tilde{p} - kv_L = -\tilde{s},$$

$$k\tilde{p} + i\omega n_0 mv_L = -f_L,$$
(2.22a)

і поперечні рівняння

$$i\omega n_0 m v_{T'} = -f_{T'},$$
  
 $i\omega n_0 m v_{T''} = -f_{T''},$ 
(2.226)

де  $\tilde{p} = -ip(\mathbf{k}, \omega)$  і  $\tilde{s} = -is(\mathbf{k}, \omega)$ . Як показано на рис. 2.60, рівняння (2.22) можна схематизувати як стаціонарну схему, елементи якої включають «ємність»  $1/\gamma p_0$ , «індуктивність»  $n_0 m$  та ідеальний трансформатор з коефіцієнтом витків k. Вихідні члени  $\tilde{s}$  і  $f_a$  відіграють роль генератора "прикладеного струму" з нескінченним опором шунта і генераторів "прикладеної напруги" з нульовим серійним імпедансом, відповідно, тоді як  $\tilde{p}$  і  $v_a$  діють як "напруга" на ємності  $1/\gamma p_0$  і «струми» шляхом індуктивності  $n_0 m$ . При цьому існує незалежність або розділення поздовжнього (L) і поперечного (T) контурів.



Рис. 2.59 Система координат  $\mathbf{k}_{0}, \mathbf{T}_{0}, \mathbf{T}_{0}^{'}$ .

За відсутності збудження (тобто  $\tilde{s} = 0 = f_a$ ), з рівнянь. (2.22), або з контуру поздовжнього збудження видно, що акустичні поля без джерела, що не зникають, можливі для тих  $\mathbf{k}, \omega$ , які задовольняють «умову резонансу» (загальний опір мережі = 0)

$$i\omega n_0 m + \frac{k^2}{i\omega/(\gamma p_0)} = 0, \qquad (2.23a)$$

останнє еквівалентно тому, що, «дисперсійне рівняння» (відповідний визначник = 0) має вигляд

$$\left(k^2 - \frac{\omega^2}{a^2}\right) = \left(k + \frac{\omega}{a}\right) \left(k - \frac{\omega}{a}\right) = 0, a = \sqrt{\frac{\gamma p_0}{n_0 m}}.$$
(2.236)

Це дало змогу те, що дійсні значення  $\mathbf{k}_{,\omega}$ , очевидно, характеризують два плоских хвильових поля, які рухаються в напрямках  $\pm \mathbf{k}_{,0}$  з акустичною швидкістю *а*. Тиск *p* і поздовжня швидкість  $v_{,L}$  є єдиними компонентами поля, які не зникають, асоційованими з цими хвилями без джерела. З рівнянь (2.22) або схем можна зробити висновок, що для хвильової структури цих поздовжніх хвиль (характерного імпедансу) справедливе співвідношення

$$\frac{p}{v_L} = \pm \sqrt{\frac{n_0 m}{1 / (\gamma p_0)}}$$
(2.23B)

зі знаками  $\pm$ , які стосуються хвиль, що рухаються в напрямках  $\pm \mathbf{k}_0$  відповідно.



### Стаціонарна потужність, що випромінюється акустичним джерелом

У кожній точці **r**, *t* загальна густина потужності, що постачається джерелом  $s(\mathbf{r},t)$  до акустичного поля, дорівнює  $-p(\mathbf{r},t)s(\mathbf{r},t)$ , як встановлено рівнянням (2.2). Таким чином, у недисипативному необмеженому середовищі загальна акустична *енергія*, що подається в поле розподіленим джерелом  $s(\mathbf{r},t)$ , дорівнює

$$-\int p(\mathbf{r},t)s(\mathbf{r},t)d\mathbf{r}dt = -\int p(\mathbf{k},\omega)s^*(\mathbf{k},\omega)\frac{d\mathbf{k}d\omega}{(2\pi)^4},$$
 (2.24a)

де правий член слідує з рівнянь. (2.1а) і (2.2), плюс спостереження, що  $s(-\mathbf{k}, -\omega) = s^*(\mathbf{k}, \omega)$  для дійсних  $\mathbf{k}, \omega$ . Загальна *потужність*, що випромінюється на частоті  $\omega_0$  гармонічним джерелом у вигляді  $s(\mathbf{r})e^{i\omega_0 t}$ , є дійсною частиною енергії (2.24а), яка подається в поле за умови перетворення джерела  $s(\mathbf{k}, \omega) = s(\mathbf{k}) 2\pi \delta(\omega - \omega_0)$ , отримана з рівняння (2.1b), замінюється в рівнянні (2.24а) як

$$P_{rad}(\omega) = \operatorname{Re} \int p(\mathbf{k}, \omega) s^{*}(\mathbf{k}) \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^{3}} = \operatorname{Re} \int G_{11}(\mathbf{k}, \omega) |s(\mathbf{k})|^{2} \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^{3}}, (2.246)$$

де  $\omega = \omega_0$  в рівнянні (2.24b). Очевидно, що лише дійсна (резистивна) частина функції Гріна  $G_{11}(\mathbf{k}, \omega)$ , задана в рівняннях (2.19), необхідна для розрахунку потужності випромінювання в необмеженому просторі.

Для окремого випадку складного гармонічного точкового джерела частинок  $s(\mathbf{r}) = S \delta(\mathbf{r})$  (тобто  $s(\mathbf{k}) = S$ ), акустична потужність, що випромінюється на частоті  $\omega$ , дорівнює (за формулами. (2.246) і (2.19))

$$P_{rad}(\omega) = \int \omega n_0 m \pi \delta \left( k^2 - \frac{\omega^2}{a^2} \right) |S|^2 \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^3} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{n_0 m}{1/(\gamma p_0)}} |Sk_a|^2, \ k_a = \omega / a,$$
(2.25)

де інтегрування по **k** здійснено у сферичній системі координат з  $d\mathbf{k} = 4\pi k^2 dk$ , і слід зазначити, що

$$\delta\left(k^2 - \frac{\omega^2}{a^2}\right) = \frac{\delta(k - \omega / a)}{2k}$$
для  $0 < l < \infty$ .

(Зверніть увагу, що  $\delta(ax) = |a|^{-1} \delta(x)$ ).

Аналогічно, прикладена потужність зусиль  $\mathbf{f}(\mathbf{r},t)$  гармонічної форми  $\mathbf{f}(\mathbf{r})e^{i\omega_{0}t}$  буде випромінювати на частоті  $\omega = \omega_{0}$  акустичну потужність

$$P_{rad}(\omega) = \operatorname{Re} \int \mathbf{f}^{*}(\mathbf{k}) \tilde{G}_{22}(\mathbf{k}, \omega) \mathbf{f}(\mathbf{k}) \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^{3}}, \qquad (2.26)$$

де f(k) – просторове перетворення Фур'є для f(r). Для необмеженого середовища, в якому можуть випромінюватися лише поздовжні хвилі, рівняння (2.26) з використанням (2.19) зводиться до

$$P_{rad}(\omega) = \operatorname{Re} \int G_{22L}(\mathbf{k}, \omega) |\mathbf{f}_{L}(\mathbf{k})|^{2} \frac{d\mathbf{k}}{(2\pi)^{3}}, \qquad (2.27)$$

де індекс "*L*" позначає поздовжню складову.

### 2.6. Висновки до розділу 2

Запропоновано (розроблено) новий метод акустометрії з формулюванням оригінального терміну векторне імпульсно-частотне зондування (векторне IЧЗ анг. Vector PFS Pulse-Frequency Sounding). Цей метод визначається комбінацією та синергією трьох взаємодоповнюваних науково значимих рішень:

•дослідження проводять шляхом збурень зондуючих імпульсів звукових коливань, тривалість та спектр яких оптимізується відповідно до задач та умов експерименту;

•формування зондуючих імпульсів в досліджуваному приміщенні відбувається з використанням векторного (селективно-направленого в просторі) активування звукових коливань;

•синтез набору інформативних сигналів відбувається шляхом формування імпульсів звукових коливань з заданим відповідно до алгоритму дослідження набору одночастотних коливань, детектування яких здійснюється на основі кореляційних та автокореляційних методів частотної селекції.

Показано, що розроблення систем акустометрії та їх САПР є комплексним процесом, що включає в себе певну послідовність взаємозв'язаних процесів. Спочатку визначаються методи та засоби модельного дослідження сигнальних трактів. Важливо відзначити, що предметами модельних досліджень в цих трактах є електричні, акустичні та теплові процеси. Відтак, з метою розробки методу модельного дослідження комплексної взаємодії звукової хвилі вирішується задача синтезу макромоделі, що поєднує процеси формування сигналів трьох типів – електричних (процеси в сигнальних трактах), акустичних (процеси поширення та комплексної взаємодії звукових хвиль в об'єкті дослідження) та теплових (процеси переносу теплової енергії в сенсорах мікропотоків газу).

Далі проводиться комплекс досліджень сигнальних трактів акустометрії. Відповідно до концепції даної дисертаційної роботи такі дослідження пропонується проводити в три етапи. Першим етапом є вибір методів та моделей функціонального аналізу сигнальних трактів. Його результатом є не лише перевірка функціональності запропонованих рішень вимірювальних перетворювачів, але і реалізація модельного імітатора (симулятора) сигналів. На другому етапі досліджень сигнальних трактів розробляється метод оптимізації процесу вимірювального перетворення за критерієм компромісу між часовою роздільною здатністю та завадостійкістю вимірювання. Метою наступного, третього, етапу є синтез та параметричний аналіз схем сигнальних трактів з прив'язкою до конкретних компонентів електронних кіл – підсилювачів, фільтрів, аналого-цифрових перетворювачів тощо. Апробація запропонованих рішень здійснена в концепції програмованих систем на кристалі PSoC (Programmable System on Chip).

З метою дослідження ефективності частотної селекції сигналів акустометрії та виявлення закономірностей такої селекції з врахуванням параметрів перетворення сигналів розроблено математичну модель та програмне забезпечення M-Signal. Отримані закономірності служать основою вибору методу та параметрів перетворення сигналів відповідно до вимог точності такого перетворення та умов вимірювання акустичних параметрів приміщень.

Встановлено, що векторна та дуальна функція Гріна, які використовуються для інтегрального представлення розв'язків задач акустичного розсіювання в однорідному та неоднорідному середовищах можуть бути подані через фундаментальну скалярну функцію Гріна. Це подання справедливе як для обмеженої так і необмеженої області, а також для спряжених задач, які використовуються для знаходження розв'язків задач розсіювання з певним типом збудження.

У випадку визначення потужності акустичного випромінювання встановлено, що компоненти розв'язку задачі акустичного розсіювання є еквівалентними параметрам електричної схеми, компоненти якої визначають "ємність" та "індуктивність" схеми, тоді як збудження еквівалентне величині "прикладеного струму".

Отримано інтегральні представлення для потужності випромінювання акустичним джерелом у випадку гармонічної компоненти у джерелі збудження.

#### РОЗДІЛ З

## ЕЛЕКТРО-АКУСТИЧНІ ЅРІСЕ МАКРОМОДЕЛІ

У третьому розділі представлено метод синтезу імітаційних сигналів на основі SPICE макромоделей, що дає змогу комплексно відтворювати електричні, акустичні та теплові процеси в сенсорних перетворювачах [49, 50, 51, 53, 60, 61, 62]. Також описано метод електро-теплової аналогії для розроблення електро-акустичних моделей (P-Probe та U-Probe) [61, 62], який набув подальшого розвитку у цій роботі. Результати сформували базис для автоматизованого проєктування комплексних вимірювальних систем акустометрії.

### 3.1. SPICE макромоделі електро-акустичних перетворювачів

Вимірювальна техніка акустометрії базується на широкому переліку електро-акустичних перетворювачів, що забезпечують випромінювання тестових акустичних хвиль у заданому спектрі частот, зокрема, гучномовців та приймачів відбитих сигналів, зокрема, мікрофонів [135]. Параметри цих перетворювачів є визначальними під час створення засобів акустометрії, а відтак, розроблення їх математичних моделей є важливою задачею в галузі САПР. Як це вже відзначалося (розділ 2), актуальною проблемою є інтегрування математичних моделей електро-акустичних перетворювачів у системи схемотехнічного моделювання, зокрема SPICE, що забезпечує можливість параметричної оптимізації акустометричних перетворювачів сигналів у комплексі. Відзначалися, також, приклади наукових публікацій у **SPICE** проблематиці моделювання акустичних компонентів п'єзоелектричних ультразвукових перетворювачів, гучномовців, мікрофонів, хвилеводів тощо [190-192].

У розвиток цього напрямку в цій роботі представлено новий метод синтезу SPICE моделей вищезгаданих акустичних компонентів, що відрізняється від відомих поєднанням в структурі єдиної макромоделі параметрів електричного та акустичного імпедансів. Саме таке поєднання вирішує проблему комплексного дослідження вимірювальної техніки акустометрії.

Ілюстрація засобів та процесу вимірювання акустичного імпедансу (Sound intensity P-U probe) представлені на рис. 3.1. В них поєднуються MEMS мікрофони, що виконують функцію вимірювального перетворення тиску (P-Probe), та MEMS теплові сенсори потоку, що виконують функцію вимірювального перетворення швидкості потоку (U-Probe) повітря. Ілюстрація синтезу SPICE моделі електричного та акустичного перетворення представлена на рис. 3.2.



*Рис. 3.1 Ілюстрація засобів та процесу вимірювання акустичного імпедансу* [257-258]



Рис. 3.2 Ілюстрація синтезу SPICE моделі комплексного електричного та

акустичного перетворення

Для випромінювачів, зокрема, гучномовців (Loudspeaker, LS) перший каскад моделі представляє імпеданс електричного перетворення, а другий каскад – імпеданс акустичного перетворення. Електричне перетворення специфікуються індуктивністю ємністю та паразитною котушки електромагнітної системи гучномовця чи іншими реактивними колами формувача активуючого сигналу - підсилювачів потужності, фільтрів, узгоджуючих трансформаторів. Натомість, акустичне перетворення специфікується динамічними та резонансними характеристиками дифузора, геометрією корпусу та його отворів (фазоінверторів) тощо. Визначальним в таких синтезованих SPICE моделях є представлення реактивними RLC колами, як електричного, так і акустичного імпедансу. Для цього акустичну заміщують електричними механічну систему колами, ЩО слугують формальними аналогами акустичного імпедансу. Для приймачів, зокрема, мікрофонів (Microphone, MC), послідовність синтезу SPICE моделі є зворотною – перший каскад специфікує акустичне перетворення, зокрема, імпеданс рухомої мембрани ємнісного вимірювального перетворювача тиску повітря, а другий – електричне перетворення, зокрема імпеданс сигнального кабелю та вхідного кола підсилювача.

Приклади схем заміщення електричного перетворення та результати їх використання в SPICE моделях представлено на: рис. 3.3 - АЧХ та ФЧХ, рис. 3.4 - Re та Im складові електричного імпедансу, рис. 3.5 - діаграма Найквіста електричного імпедансу.

Приклад схеми заміщення та моделювання частотних характеристик акустичного перетворення наведено на рис. 3.6. Для формування зв'язку між схемами заміщення електричного та акустичного імпедансів використовують функціональні джерела формульного типу, зокрема, керовані джерела струму G1 типу Function Source Formula type current (рис. 3.7).



Рис. 3.3 Приклад схеми заміщення та моделювання AYX та  $\Phi YX$ 



електричного перетворення

Рис. 3.4 Приклад моделювання Re та Im складових електричного імпедансу



Рис. 3.5 Приклад діаграми Найквіста електричного імпедансу





акустичного перетворення

Рис. 3.7 Специфікація функціонального джерела струму

Специфікація таких функціональних джерел відображає передавальну характеристику між каскадами електричного та акустичного імпедансів. При цьому аргументами функцій цих джерел в схемі заміщення акустичного імпедансу служать струм чи падіння напруги в схемі електричного імпедансу та коефіцієнти електро-акустичного взаємозв'язку.

Приклад синтезованої електро-акустичної схеми заміщення SPICE моделі та частотні характеристики комбінованого електро-акустичного перетворення представлено на рис. 3.8, а приклад результатів моделювання електроакустичного імпедансу та відповідні діаграми Найквіста – на рис. 3.9 та рис. 3.10.



Рис. 3.8 Приклад схеми заміщення та моделювання АЧХ та ФЧХ електро-



## акустичного перетворення

Рис. 3.9 Приклад моделювання Re та Im складових електро-акустичного



Рис. 3.10 Приклад діаграми Найквіста електро-акустичного імпедансу

Кількість та параметри RLC кіл електричного та акустичного імпедансу може бути довільною і визначається точністю (складністю) моделі. Більш детально питання специфікації SPICE моделей акустичних перетворювачів представлено в наступному підрозділі, де розглянуті аналітичні залежності, апроксимація характеристик та послідовність етапів синтезу схем заміщення термічних сенсорів потоку акустичної імпедансометрії. Представлений метод побудови моделей є універсальним. Так, використовуючи функціональні джерела представляється можливим синтезувати перелік інших параметрів акустичних перетворювачів, зокрема, їх діаграму направленості.

#### 3.2. Структури термічних сенсорів потоку акустичної імпедансометрії

На основі аналізу літературних даних відзначимо, що більшість сучасних термічних сенсорів потоку (Flow sensor) базуються на трьох основних структурних схемах вимірювання (рис. 3.11).



Рис. 3.11 Структурні схеми вимірювання термічних сенсорів

Перша з них, вимірювальний перетворювач (сенсор) анемометричного (Anemometer) типу (рис. 3.11, а), є найбільш структурно простою і використовує лише один компонент – нагрівник H<sub>Q</sub>, температура Т якого параметром інтенсивності відводу теплової служить інформативним потужності Q, що виділяється на цьому нагрівнику. Відтак, параметри цього нагрівника, і, зокрема, його вольт-амперна характеристика (ВАХ), повинні залежати від температури. Переважно використовується металічні чи напівпровідникові терморезистори R<sub>T</sub>. Температура цих терморезисторів визначається за наперед відомими коефіцієнтами термічного опору. Металічні здебільшого терморезистори, які називають термометрами опору,

виготовляють з мідного, платинового чи золотого дроту. Їх характеризує висока лінійність функції перетворення, однак, їх чутливість є суттєdo нижчою ніж це має місце в напівпровідникових терморезисторах, які здебільшого називають термісторами. Суттєвим недоліком останніх є висока нелінійність та значна часова нестабільність температурних коефіцієнтів.

Суттєвими недоліками вимірювальних перетворювачів анемометричного типу є значна залежність вихідного сигналу сенсора потоку від температури речовини цього потоку чи температури оточуючого середовища, та неможливість побудови векторних сенсорів потоку, які б забезпечували можливість визначення не лише швидкості потоку, але і його напрямку.

Позбуваються цих недоліків з переходом на наступні з вище наведених структурних схем вимірювання, які здебільшого називають терміном калориметричні (Calorimeter) сенсори потоку. Серед них розрізняють схему з двома анемометрами (рис. 3.11, б) та схему з рознесенням нагрівних та сенсорних компонентів (рис. 3.11, в).

Схема з двома анемометрами (рис. 3.11, б) базується на ефекті віднесення вимірювальним потоком теплової енергії з структури одного анемометра  $R_{T1}$ на структуру іншого  $R_{T2}$ . Таким чином, охолодження потоком анемометра  $R_{T1}$ є значнішим ніж анемометра  $R_{T2}$ . Позитивний ефект досягається різницевим методом вимірювання, який, по-перше, в значній мірі компенсує зміні температури оточуючого середовища, і по-друге, уможливлює визначення напрямку потоку (йдеться лише про напрямок, а не вектор).

Схема з рознесенням нагрівних та сенсорних компонентів (рис. 3.11, в) використовує один нагрівник  $H_Q$  та два сенсори температури  $R_{T1}$ ,  $R_{T2}$ . Реалізація такого сенсора потоку різницевого типу на основі MEMS структур представлена на рис. 3.12, а. В кремнієвому чіпі (1) формується мембрана (2), що підвищує термічну ізоляцію між нагрівником  $H_Q$  (3) та двома рівновіддаленими сенсорами температури  $S_1$  (4),  $S_2$  (5). Інформативним сигналом сенсора потоку в цій схемі є різниця температур між цими сенсорами. Схема вимірювання такого сенсора потоку різницевого типу

наведена на рис. 3.12, б. Нагрівником служить резистивний компонент R<sub>Q</sub>, а сенсорами температури терморезистори R<sub>T1</sub>, R<sub>T2</sub>. Здебільшого використовується мостова схема вимірювання з двома сталими резисторами R<sub>01</sub>, R<sub>02</sub>.

Структурно та схема є найбільш складною, однак, її перевагами є менше енергоспоживання (нагрівається лише один компонент) та можливість побудови 2D (2 Dimensions) векторних сенсорів потоку. Топологія та фотографія кристалу такого 2D сенсора потоку, що містить чотири рівновіддалених від нагрівника  $H_Q$  сенсори температури S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub> наведені на рис. 3.13. Інформація про швидкість потоку та його вектор 2D просторі отримується на основі вимірювання різниць температур вищезгаданих сенсорів S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>. Кількість сенсорів температури та їх взаємне розміщення може бути довільним і є об'єктом дослідження в численних публікаціях.



Рис. 3.12 MEMS структура (а) та схема вимірювання (б) сенсора потоку різницевого типу



Рис. 3.13 Топологія (а) та фотографія кристалу (б) 2D сенсора потоку

У сучасних термічних сенсорах потоку використовують різноманітні схеми перетворення сигналів, зокрема, схеми з постійною потужністю нагріву СР (Constant Power), з постійною різницею температур СТД (Constant Temperature Difference), з вимірюванням часу поширення теплової хвилі (ToF, time-of-flight) тощо [147]. Різноманіття цих схем, а також необхідність оптимізації режимів живлення (зокрема, мінімізації 3 метою енергоспоживання) та формування сигналів (зокрема, з врахуванням вимог до Rail-to-Rail інтегральних схем) для широкого різноманіття електрофізичних параметрів MEMS структур, обумовлює необхідність розробки сигнальних моделей термічних сенсорів температури та їх інтегрування в системи автоматизованого проєктування електронних схем (зокрема, аналогового фронт-енду - Analog Front-end, AFE).

У дисертаційній роботи розроблено алгоритм синтезу SPICE моделей вищерозглянутих термічних сенсорів потоку для пристроїв акустичної імпедансометрії. Розглянемо послідовність його реалізації.

### 3.3. Синтез макромоделі - етап #1

На першому етапі необхідно перейти від конструктивних та електрофізичних параметрів MEMS структур до параметрів SPICE моделі. Зокрема, відзначимо, що різницю температур  $\Delta T_H$  між нагрівником, на якому виділяється теплова потужність *P*, та оточуючим середовищем можна представити виразом [147]

$$\Delta T_H = \frac{P}{K_F W_H \left(\frac{L_H}{\delta} + \sqrt{\frac{V_F \delta^2}{4a^2} + 4K_D}\right)}$$

де:

*К<sub><i>F*</sub> – теплопровідність речовини потоку;

*W<sub>H</sub>*, *L<sub>H</sub>* – ширина на довжина нагрівника;

 $\delta$ - товщина приграничного шару;

 $V_{F}$  – швидкість потоку;

а – коефіцієнт термічної дифузії речовини потоку;

К<sub>D</sub> – безрозмірний коефіцієнт -

$$K_D = \frac{1}{2} + \frac{K_S D}{K_F \delta};$$

*K*<sub>*S*</sub> – теплопровідність MEMS структури (кремнію);

*D* – товщина MEMS діафрагми.

Перетворимо цей вираз у зручнішу для побудови SPICE моделі форму

$$\Delta T_H = \frac{P}{k_1 + k_2 \sqrt{V_F + k_3}}$$

де:  $k_1, k_2, k_3$  - коефіцієнти пропорційності.

Для цього виконаємо наступне перетворення

$$\Delta T_H = \frac{P}{\frac{L_H K_F W_H}{\delta} + \frac{\delta K_F W_H}{2a} \sqrt{V_F + \frac{16K_D a^2}{\delta^2}}},$$

та визначимо вищезгадані коефіцієнти пропорційності

$$k_1 = \frac{L_H K_F W_H}{\delta} ,$$
  

$$k_2 = \frac{\delta K_F W_H}{2a} ,$$
  

$$k_3 = \frac{16K_D a^2}{\delta^2} .$$

Приклади розрахунку різниці температур  $\Delta T_H$  для коефіцієнтів, відповідно до таблиці 3.1 наведено на рис. 3.14, а до таблиці 3.2 - на рис. 3.15 (де, а.u. – arbitrary units, умовні одиниці).

Таблиця 3.1

	[1]	[2]	[3]	[4]
P =	1	1	1	1
k1 =	0,001	0,001	0,001	0,001
k2 =	0,001	0,002	0,004	0,009
k3 =	80	20	5	1

Набір коефіцієнтів МІ



Рис. 3.14 Сімейство залежностей  $\Delta T_H = f(P, V_F, k_1, k_2, k_3)$  (набір M1)

Таблиця 3.2



Набір коефіцієнтів М2

Рис. 3.15 Сімейство залежностей  $\Delta T_H = f(P, V_F, k_1, k_2, k_3)$  (набір M2)

Відмінністю цих наборів коефіцієнтів, а відтак і отриманих результатів розрахунку, є різниця температур  $\Delta T_H$  між нагрівником та оточуючим середовищем без впливу потоку, тобто при  $V_F = 0$ . У першому наборі коефіцієнтів (M1) має місце фіксоване значення різниці температур  $\Delta T_H (V_F =$ 0), зокрема для наглядності представлено значення  $\Delta T_H (V_F = 0) = 100$  °C. Можна бачити, що для заданої потужності нагріву, зокрема P = 1 Вт, початкове значення  $\Delta T_H$  є сталим. При цьому для різних параметрів MEMS структури, має місце різний характер зміни  $\Delta T_H$  при зростанні швидкості потоку (M2). Ця обставина суттєво вливає на лінійність функції перетворення сенсора потоку – за певних значень коефіцієнтів ця функція є практично лінійною (зокрема, це варіанти 1, M1 та 4, M2), однак за інших – відносна чутливість сенсора суттєво зменшується зі збільшенням швидкості потоку (зокрема, це варіанти 4, M1 та 1, M2).

Результатом першого етапу синтезу SPICE моделі є схема заміщення нагрівника в статичному режимі роботи, тобто, без врахування перехідних процесів теплової релаксації. Приклад такої схеми заміщення наведено на рис. 3.16.

відзначалося, побудови SPICE Як це вже вище для моделі використовується принцип формальної аналогії, відповідно до якого параметри фізичних величин, зокрема, швидкість потоку, та коефіцієнти пропорційності у математичних виразах моделей, зокрема  $k_1, k_2, k_3$ , представляються (заміщаються) параметрами компонентів електричних кіл. Це забезпечує можливість оперативної модифікації параметрів моделі з використанням способу Stepping (рис. 3.17), в якому передбачені різноманітні варіанти зміни параметрів компонентів під час модельного дослідження.

У схемах заміщення з використанням методу формальної аналогії не є важливими взаємозв'язки між компонентами, параметри яких є формальними аналогами параметрів фізичної моделі, тобто, без врахування фізичної суті моделі чи розмірності її коефіцієнтів. Натомість, вищезгадані взаємозв'язки описуються аналітично при специфікації параметрів функціональних джерел та інших компонентів схеми заміщення. Під час синтезу схеми заміщення важливим є дотримання вимог SPICE синтаксису та відсутність недопустимих з'єднань. Зокрема, недопустимими є «закорочення» джерел напруги на нульовий опір («землю» чи інший потенціал схеми) та джерел струму на безмежний опір тощо.



Рис. 3.16 Схема заміщення SPICE моделі нагрівника в статичному режимі

DC	Scope Monte Carlo Help		11) Stepping		
	Run	F2			
$\checkmark$	Limits	F9	♥ 1:RK3 2: 3: 4: 5: 6: 7: 8: 9: 10: 11: 12: 13: ↓		
	Stepping	F11	Step What RK3		
	Optimize	Ctrl+F11	List   5,10,20,30		
	Worst Case	Alt+6	To Ju		
$\checkmark$	Analysis Window	F4	Step Valle   113		
	Watch	Ctrl+W	Image: Provide and the symbolic         Image: Provid		
	Breakpoints	Alt+F9			
	Operating Point Methods	Ctrl+Shift+O	Change C Sten all variables simultaneously		
	3D Windows	•			
	Performance Windows	+	All On All Off Default OK Cancel Help		
	Fourier Windows	Þ	The part, model, or variable name		

Рис. 3.17 Спосіб модельних досліджень Stepping

З урахуванням цих застережень, схема заміщення SPICE моделі нагрівника в статичному режимі містить такі компоненти:

- VF джерело, напруга якого є формальним представленням швидкості потоку V<sub>F</sub>
- RHV резистивний нагрівник R<sub>Q</sub>;
- VH джерело напруги живлення нагрівника R<sub>Q</sub>;
- EP функціонально кероване джерело типу NFV (Function Source Formula type voltage, рис. 3.18), напруга якого є формальним представленням

теплової потужності, що виділяється на нагрівнику R<sub>Q</sub> та специфікується відповідно до SPICE синтаксису функцією V(VH)\*V(VH)/R(RHX);

- ЕТН функціонально кероване джерело типу NFV, напруга якого є формальним представленням температури *∆T<sub>H</sub>* нагрівника R<sub>Q</sub> та специфікується функцією V(EP)/(R(Rk1)+R(Rk2)\*sqrt(V(VF)+R(Rk3)));
- Rk1, Rk2, Rk3 резистори, опори яких є формальним представленням коефіцієнтів k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub>;
- RVH, REP, RTH резистори допоміжні компоненти, що використовуються для забезпечення вимог SPICE синтаксису.



Рис. 3.18 Специфікація джерела ЕР типу NFV

Приклад результатів модельних досліджень розглянутої схеми заміщення, для набору RK3 = 5 (1), 10 (2), 20 (3), 30 (4) – представлено на рис. 3.19. Можна бачити, зокрема, що результат SPICE моделювання відповідає вище представленому на рис. 3.15 сімейству залежностей  $\Delta T_H = f(P, V_F, k_1, k_2, k_3)$ .



Рис. 3.19 Результат моделювання для набору RK3 = 5 (1), 10 (2), 20 (3), 30 (4)

#### 3.4. Синтез макромоделі - етап #2

На другому етапі синтезу схеми заміщення SPICE моделі теплового сенсора потоку специфікуємо параметри компонентів, які описують інформативний сигнал калориметричного сенсора з рознесенням нагрівних та сенсорних компонентів (рис. 3.11, в). Цим сигналом є різниця температур  $\Delta T_S$  між двома сенсорами S<sub>1</sub> та S<sub>2</sub>. Зокрема, різниця температур в MEMS сенсорах потоку між двома сенсорами температури S<sub>1</sub> (Downstream) та S<sub>2</sub> (Upstream), які віддалені від нагрівника на відстані L<sub>D</sub> (Downstream) та L<sub>U</sub> (Upstream), можна представити формулами

$$\Delta T_S = \Delta T_H [exp(\gamma_2 L_D) - exp(\gamma_1 L_U)] ,$$

де

$$\gamma_{1,2} = \frac{V_F \pm \sqrt{V_F^2 + \frac{16a^2 K_D}{\delta^2}}}{4a K_D}$$

Однак, як нами встановлено, результати розрахунків за цими формулами не повною мірою відповідають отриманими нами даними експериментальних дослідження MEMS сенсорів потоку (рис. 3.13, б). Приклад результатів таких досліджень представлено на рис. 3.20, де: Flow velocity V<sub>F</sub>, liters/min – швидкість потоку повітря в літрах за хвилину,  $\Delta T_S$  – різниця температур між парою сенсорів температури.



*Рис. 3.20 Результат експериментальних досліджень сигналу MEMS сенсора* потоку калориметричного типу

Можна бачити, що функція залежності різниці температур  $\Delta T_s \epsilon$  екстремальною, а при певному значенні швидкості потоку (у цьому прикладі приблизно 2 liters/min) процес вимірювання калориметричним методом стає неможливим. Це явище обумовлюється охолодженням нагрівача, а відтак, зменшенням, як його температури, так і різниці температур рівновіддалених від нього сенсорів температури.

Очевидним є факт, що мінімізувати охолодження нагрівника можна підвищуючи потужність нагріву. Однак, вимоги до сучасної електроніки обумовлюють необхідність зменшення енергоспоживання, що і обумовлює протиріччя такого рішення. Враховуючи вищесказане, сигнальний аналіз сучасних енергоекономних сенсорів потоку має важливе значення та потребує розроблення відповідних математичних моделей.

Під час систематизації численних результатів даних експериментальних досліджень нами запропонована емпірична функціональна залежність

$$K_F = \frac{aV_F}{(a+V_F)^2},$$

яка достатньо точно відображає характерні закономірності інформативного сигналу теплових сенсорів потоку (де  $V_F$  — швидкість потоку,  $K_F$  та а — коефіцієнти). Приклад розрахунку цієї функціональної залежності для а = 5, 10, 15 та 40 представлено на рис. 3.21. Можна бачити, що в заданому діапазоні швидкості потоку характер нелінійності залежить від коефіцієнту а та представляє широкий перелік характеристик сенсорів потоку — від лінійних (квазілінійних) при значній потужності нагрівника до екстремальних при незначній потужності нагрівника (його значному охолодженні потоком).



Рис. 3.21 Функція нелінійності сигналу

Використовуючи наведену функцію нелінійності сигналу та враховуючи, що остання визначається потужністю нагріву P, нами запропонована емпірична формула залежності різниці температур  $\Delta T_s$  від швидкості потоку V<sub>F</sub> та потужності нагрівника P

$$\Delta T_{S} = \frac{(k_{4}P)^{3}V_{F}}{(k_{5}P + V_{F})^{2}},$$

де k<sub>4</sub>, k<sub>5</sub> – коефіцієнти.

Приклади розрахунку таких залежностей для двох наборів коефіцієнтів  $P, k_4, k_5$  (табл. 3.3, табл. 3.4) представлені, відповідно, на рис. 3.22 (низька потужність нагріву) та рис. 3.23 (висока потужність нагріву).

Таблиця 3.3

	[1]	[2]	[3]	[4]
P =	0,5	1	1.5	2.0
k4 =	2.5	2.5	2.5	2.5
k5 =	10	10	10	10

Набір коефіцієнтів МЗ



Рис. 3.22 Сімейство залежностей  $\Delta T_S = f(P, V_F, k_4, k_5)$  (набір М3)

Таблиця 3.4



Набір коефіцієнтів М4

Рис. 3.23 Сімейство залежностей  $\Delta T_S = f(P, V_F, k_4, k_5)$  (набір M4)

Відповідно до цих результатів, вводимо в схему заміщення SPICE моделі теплового сенсора потоку калориметричного типу такі компоненти (рис. 3.24):

- ЕDH функціонально кероване джерело, напруга якого є формальним представленням різниці температур Δ*T<sub>s</sub>* та специфікується функцією R(Rk4)\*R(Rk4)\*R(Rk4)\*V(EP)\*V(EP)\*V(EP)\*V(VF)/((R(Rk5)\*V(EP)+V(V F)));
- Rk4, Rk5 резистори, опори яких є формальним представленням коефіцієнтів k<sub>4</sub>, k<sub>5</sub>.
- RDH допоміжний компонент, що використовуються для забезпечення вимог SPICE синтаксису.

Приклад результатів модельних досліджень такої схеми заміщення, для наборів значень напруги живлення VH нагрівника, квадратична функція якої V(VH)\*V(VH)/R(RHX), де для прикладу RHX = 25 Ом, визначає потужність нагріву представлено на рис. 3.25. Можна бачити, зокрема, що результат SPICE моделювання відповідає вище представленим на рис. 3.14 та рис. 3.15 сімействам залежностей  $\Delta T_S = f(P, V_F, k_4, k_5)$ .



Рис. 3.24 Схема заміщення SPICE моделі калориметричного сенсора потоку



Рис. 3.25 Результат моделювання для наборів напруги VH на нагрівнику

## 3.5. Синтез макромоделі - етап #3

На третьому етапі синтезу схеми заміщення теплового сенсора потоку вирішуємо задачу моделювання його динамічних характеристик, які визначаються часовими параметрами теплової релаксації компонентів MEMS структури.

Часова залежність температури T(t) в імпульсному режимі нагріву потужністю Р та подальшого остигання може бути представлена виразом [148]

$$T(t) = T_A + PZ_O(t),$$

де Z<sub>Q</sub>(t) – тепловий опір;

$$Z_{Q}(t) = \sum_{i=1}^{N} Z_{Qi} \left( 1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_{i}}\right) \right) - \text{під час нагрівання;}$$
$$Z_{Q}(t) = \sum_{i=1}^{N} Z_{Qi} \exp\left(\frac{-t}{\tau_{i}}\right) - \text{під час вистигання;}$$

Z<sub>Qi</sub> – теплові опори ділянок структури в постійному режимі нагріву;

 $\tau_1, \tau_2, \dots \tau_N$  – теплові постійні цих ділянок структури  $\tau_i = Z_{Qi} \cdot C_{Ti};$ 

Сті – теплоємність і-ї ділянки структури.

Для теплового аналізу MEMS структури інтегральної схеми теплового сенсора потоку, в останній достатньо виділити, принаймні, дві параметричні ділянки, кожну з яких описати характерними для неї величинами Z<sub>Ti</sub>, C<sub>Qi</sub>.

Перша ділянка відповідає мембрані, тепловий опір якої є найвищим, а теплова постійна найменшою. Друга ділянка відповідає кристалу MEMS структури. Для дослідження динаміки зміни сигналу при швидкій зміні параметрів потоку чи оточуючого середовища в цілому, їх також представляють відповідними тепловими опорами та теплоємностями.

Концепція електротеплової аналогії полягає в заміщенні теплових характеристик на їх електричні аналоги: різниця температур  $\Delta T(t)$  заміщається різницею напруг  $\Delta V(t)$ , тепловий потік  $\Phi_T$  чи потужність  $P_T$  заміщається електричним струмом  $I_T$ , а тепловий опір  $R_{\theta}$  та теплоємність  $C_{\theta}$  – еквівалентними їм електричним опором  $R_T$  та ємністю  $C_T$  конденсатора.

Відтак, теплові перехідні процеси описуються еквівалентними схемами у вигляді декількох R<sub>i</sub>C<sub>i</sub> ланок. Приклади дослідження SPICE моделей таких ланок для двох варіантів параметрів компонентів цих ланок представлено на рис. 3.26 (для завершених циклів теплової релаксації) та рис. 3.27 (для завершених циклів теплової релаксації).



Рис. 3.26 Дослідження еквівалентної схеми з трьох R<sub>i</sub>C<sub>i</sub> ланок (варіант 1)



Рис. 3.27 Дослідження еквівалентної схеми з трьох R<sub>i</sub>C<sub>i</sub> ланок (варіант 2)

Для синтезу еквівалентних схем теплової релаксації теплових сенсорів потоку доцільно використовувати дві незалежні RC лаки, перша з яких відповідає процесам теплової релаксації нагрівника при зміні режимів його живлення, а друга - процесам теплової релаксації нагрівника та сенсорів температури при зміні швидкості потоку. 3 метою забезпечення універсальності аналізу широкого переліку різних комбінацій процесів теплової релаксації використаємо універсальні моделі незалежних джерел струму (Independent Current Source), специфікація яких відповідно до SPICE синтаксису представлена на ілюстрації рис. 3.28.

Independent Current Source - Current Source							
SPICE format: Syntax: I <name> <plus> <minus> [[ DC] value] +[ AC magval [phaseval]] +[PULSE i1 i2 [td[tr[tf[pw[per]]]]]] or [SIN io ia [freq[td[df[phase]]]]] or [EXP i1 i2 [td1[tc1[td2[tc2]]]]] or [PWL t1 i1 t2 i2[tn in]] or [SFFM io ia freq [mi[fm]]] or [NOISE interval [amplitude [start [end [seed]]]]]</minus></plus></name>		Description Initial value Pulse value Delay Rise time Fall delay Pulse width Period Pis the print inte alysis Limits dia	Units V or A V or A sec. sec. sec. sec. sec. rval obtain log box.	Default none 0 TSTEP* TSTEP* TSTOP* TSTOP* TSTOP*			

Рис. 3.28 Ілюстрація специфікації Independent Current Source

У схемах заміщення SPICE моделей у колі теплової релаксації нагрівника при зміні режимів його живлення використаємо джерело струму IEP, а в колі
теплової релаксації нагрівника та сенсорів температури при зміні швидкості потоку – джерело IF. Приклади їх специфікації представлено на рис. 3.29.



Рис. 3.29 Приклади специфікації джерел IEP та IF

Для поєднання аналізу типу DC (Direct Current, постійний струм), в якому досліджують статичні функціональні залежності, та Transient (Перехідні процеси), в якому досліджують динамічні характеристики, важливим є коректно специфікувати параметри вищезгаданих джерел IEP та IF. Зокрема, амплітуда імпульсів струму (I2) для Transient аналізу повинна відповідати значенню DC струму (рис. 3.29).

Для спрощення подальшого викладу в колах навантаження джерел струму IEP та IF використаємо по одній RC ланці. Приклади досліджень нормованих сигналів релаксацій у цих ланках наведені на рис. 3.30 та рис. 3.31.



Рис. 3.30 Релаксація в колі джерела IEP при CIE = 0 (1), 1E-5 (2), 1E-4 (3)



Рис. 3.31 Релаксація в колі джерела IF при CF = 5E-5 (1), 1E-4 (2), 2E-4 (3)

Далі, використовуючи сигнали цих релаксацій, а саме нормовані значення напруги на резисторі RIE (рис. 3.30) та напруги на резисторі RF (рис. 3.31), вводимо динамічні параметри теплових процесів нагрівника. Зокрема, у специфікацію джерела EP (рис. 3.32) вводимо значення V(RIE) на резисторі RIE

а у специфікацію джерела ЕТН (рис. 3.33) – значення V(RF) на резисторі RF

V(ETH)=V(EP)/(R(Rk1)+R(Rk2)\*sqrt(V(VF)\*V(RF)+R(Rk3))).

Таким чином, температура нагрівника стає функціонально залежною не лише від постійного значення потужності, але і від швидкості зміни цієї потужності P(t) та зміни швидкості потоку V<sub>F</sub>(t).



Рис. 3.32 Специфікація джерела ЕР



Рис. 3.33 Специфікація джерела ЕТН

На завершення цього етапу відповідно коректуємо специфікацію джерела EDT (рис. 3.34), напруга якого, як це відзначено вище, є формальним представленням різниці температур  $\Delta T_S$ 

V(EDT) = R(Rk4) \* R(Rk4) \* R(Rk4) \* V(EP) \* V(EP) \* V(EP) \* V(VF) \* V(RF) / ((R(Rk5) \* V(EP) + V(VF) \* V(RF))) \* (R(Rk5) \* V(EP) + V(VF) \* V(RF))).



Рис. 3.34 Специфікація джерела EDT

Приклад використання вищерозглянутої схеми заміщення SPICE моделі для представлення динамічних характеристик сенсора потоку, які визначаються часовими параметрами теплової релаксації компонентів MEMS структури, представлено на рис. 3.35. Цей приклад представляє варіант одночасної теплової релаксації за імпульсного живлення нагрівника та вмикання-вимикання потоку.



Рис. 3.35 Приклад модельних досліджень теплової релаксації

# 3.6. Синтез макромоделі - етап #4

На четвертому етапі синтезу схеми заміщення теплового сенсора потоку вирішуємо задачу синтезу вихідного кола різницевого сенсора температури. Здебільшого в MEMS сенсорах потоку використовуються резистивні сенсори температури, а відтак, опір цих резисторів повинен визначатися функцією їх температури. У простих моделях використовують лінійний (TC1) та квадратичний (TC2) температурні коефіцієнти, які визначають температурну залежність резистора при заданих температурі (рис. 3.36, рис. 3.37).

₩ Resistor		-							
Name			Valu	e					
MODEL		⊑ s	how RH			•	Show	Cha	nge
Display								Sh	ape
F Pin Ma	Pin Markers     Pin Names     Pin Numbers     Current     Power     Condition     Border     Border     Border								
PART-RT1 RESIDENCE-100 RESIDEN							dance vs. F 💌		
PSV= COST= POWER= SHAPEGRO PACKAGE=	UP=Def	ault				<b>}</b>		RH	
ОК	Cano	el Font	Add	Delete	Browse	Combine	tions		
New	Find.	Plot	Syntax	IBIS	Help	Sing	e		
Finabled	₩ Hel	p Bar				Eile Link			
	112			Sou	rce: Local pa	age 'Models	1		
	CP	undefined		LS	undefined			NM	1
	R	1		T_ABS	undefined		T_MEAS	URED	undefined
T_REL_GLOBAL undefined		undefined	T_R	EL_LOCAL	undefined			TC1	0.003
	TC2	0.0001		TCE	0				
			I	Resist	or Para	amete	rs Ta	ble:	
Name			Parame	eter	ultiplier				Units
CP			Parallel canacitance				F		
			Series inductance				н		
LO TC1			Linear temperature coefficient				1/Coleiue		
TC2			Quadratic temperature coefficient				1/(CalciueA2)		
TCE			Exponential temperature coefficient %/Celsius				%/Coleius		
NM Noise mult			ultiplic	mperat	ure co	enicle	ant.	/or Celsius	
TMEASUDED			Massured temperature				Coleine		
TAR			Absolute temperature				Celsius		
T PEL CLOBAL			Polative to current temperature				Calsius		
T DEL	100	AI	Relative to AKO model temperature			Celsius			
I_REL	I_REE_LOCAL Relative to ARO model temperature Celsius								

Рис. 3.36 Специфікація SPICE моделі резистивних компонентів



Рис. 3.37 Приклад модельного дослідження температурної характеристики

Однак, для вирішення задачі синтезу схеми заміщення розроблюваної SPICE моделі сенсора потоку такий варіант специфікації резисторів не забезпечує необхідної функціональності. Зокрема, у вирішуваній задачі необхідно, щоб опір резисторів вихідного кола різницевого сенсора температури визначався вище наведеними функціональних залежностями функції вимірювального перетворення сенсора потоку.

Для вирішення цієї задачі використаємо розширену специфікацію SPICE моделей резистивних компонентів, відповідно до якої опір резистора визначається не лише температурою, але і параметрами інших компонентів схеми заміщення – напруги, струму, часу (arbitrary function of any valid time domain variable) тощо. Реалізована на основі цієї розширеної специфікації схема вихідного кола сенсора та специфікація його резисторів наведені на рис. 3.38.



Рис. 3.38 Схема вихідного кола сенсора та специфікація його резисторів

Схема виконує функцію вимірювального перетворювача мостового типу і містить два функціональні резистори RT1, RT2, два сталих резистора R01, R02 та джерело напруги VET. Для прикладу, опіри функціональних резисторів визначаються виразами:

R(RT1)=100\*(1+0,003\*0,1\*V(ETH))\*(1-0,5\*0,003\*V(EDT)),

R(RT2)=100\*(1+0,003\*0,1\*V(ETH))\*(1+0,5\*0,003\*V(EDT)),

де ЕТН, ЕDT – вищерозглянуті функціонально керовані джерела, напруги яких використовуються інформативними сигналами залежностей температури нагрівника та різниці температур резистивних перетворювачів вихідного кола сенсора потоку. Коефіцієнти в даних виразах визначаються відповідними параметрами MEMS структури сенсора.

Приклади результатів використання даної схеми заміщення під час комплексних (поєднання прохідних та перехідних характеристик) модельних досліджень для чотирьох значень напруги живлення нагрівника опором R(RHX) = 25 Om (1 - V(H) = 3,53 B, P = 0,5 BT; 2 - V(H) = 5,00, P = 1,0 BT; 3 - V(H) = 6,12, P = 1,5 BT; 4 - V(H) = 7,07, P = 2,0 BT) наведено на:

- рис. 3.39 V(ETH) = f(V(VF)), V(EDT) = f(V(VF));
- рис. 3.40 R(RT1), R(RT1), V(RT2)-V(RT1) = f(V(VF));
- рис. 3.41 V(RT2)-V(RT1) = f(Time, sec);





Рис. 3.39 Прохідні характеристики V(ETH) = f(V(VF)), V(EDT) = f(V(VF))



Рис. 3.40 Прохідні характеристики R(RT1), R(RT1), V(RT2)-V(RT1) = f(V(VF))



Рис. 3.41 Перехідні характеристики V(RT2)-V(RT1) = f(Time, sec)



Puc. 3.42 Нормовані перехідні характеристики (V(RT2)-V(RT1))/I(IF) = f(Time, sec)

# 3.7. Синтез макромоделі - етап #5

**На п'ятому етапі** синтезують схему заміщення теплового сенсора потоку в цілому (рис. 3.43), ввівши в неї, крім вищезгаданих компонентів, джерела шуму XN1, XN2 та їх вихідні еквівалентні опори RN1, RN2.



Рис. 3.43 Схема заміщення SPICE моделі сенсора потоку

Лістинг синтезованої таким чином схеми заміщення моделі сенсора потоку відповідно до SPICE синтаксису є наступним:

```
CF 0 10 1E-4
CIE 0 9 1E-5
EDT 6 0 VALUE =
+ {R(RK4)*R(RK4)*R(RK4)*V(EP)*V(EP)*V(EP)*V(VF)*V(RF)/
+ ((R(RK5) *V(EP) +V(VF) *V(RF)) * (R(RK5) *V(EP) +V(VF) *V(RF)))}
EP 7 0 VALUE = \{V(RIE) * V(VH) * V(VH) / R(RHX)\}
ETH 5 0 VALUE = {V(EP)/(R(RK1)+R(RK2)*sqrt(V(VF)*V(RF)+R(RK3)))}
IEP 0 9 DC 0.01 AC 1 0 Pulse 0 0.01 0 0.1m 0.1m 5m 10m
IF 0 10 DC 0.01 AC 1 0 Pulse 0 0.01 0 1m 1m 50m 100m
R01 11 13 RH 100
R02 13 12 RH 100
RDT 0 6 RH 1k
REP 0 7 RH 1k
RF 10 0 RH 100
RHX 0 2 RH 25
RIE 9 0 RH 100
RK1 0 3 RH 0.001
RK2 3 4 RH 0.007
RK3 4 0 RH 10
RK4 0 8 RH 4.5
RK5 8 0 RH 10
RN1 14 11 RH 10k
RN2 12 15 RH 10k
RT1 11 0 RH {100*(1+0.003*0.1*V(ETH))*(1-0.5*0.003*V(EDT))}
RT2 12 0 RH {100*(1+0.003*0.1*V(ETH))*(1+0.5*0.003*V(EDT))}
RTH 0 5 RH 1k
RVF 0 1 RH 1k
VET 13 0 DC 2V
VF 1 0 DC 1 AC 1 0
VH 2 0 DC 10 AC 1 0
XN1 14 0 NOISE PARAMS: TS=10u VS=1m
XN2 15 0 NOISE PARAMS: TS=10u VS=1m
```

Приклади результатів використання цієї SPICE моделі для напруги живлення нагрівника опором R(RHX) = 25 Ом (1 - V(H) = 3,53 B, P = 0,5 BT;2 - V(H) = 5,00, P = 1,0 BT; 3 - V(H) = 6,12, P = 1,5 BT; 4 - V(H) = 7,07, P = 2,0 BT) наведено на рис. 3.44 та рис. 3.45.



Рис. 3.44 Приклад модельних досліджень під час вмикання/вимикання потоку



Рис. 3.45 Приклад модельних досліджень під час вмикання/вимикання потоку та струму живлення нагрівача

Розглянемо можливість формування функцій перетворення з використанням спеціальних (Special purpose) бібліотечних SPICE компонентів, зокрема, керованого напругою ключа (Voltage-controlled switch) типу S(V-Swich) (рис. 3.46).



Рис. 3.46 SPICE бібліотека компонентів та специфікація ключа S(V-Swich)

Параметрами такого керованого ключа є (рис. 3.47):  $R_{ON}$  (On resistance) – опір у включеному стані,  $R_{OFF}$  (Off resistance) – опір у виключеному стані,  $V_{ON}$  (Control voltage for on state) – напруга включеного стану,  $V_{OFF}$  (Control voltage for off state) – напруга виключеного стану, а його функціональна характеристика представляється псевдокодом логіки перемикання та математичними виразами:

$$\begin{split} & if \ V_{ON} > V_{OFF} \ \& \ if \ V_C \ge V_{ON} \ then \ R_s = R_{ON} \\ & if \ V_C \le V_{OFF} \ then \ R_s = R_{OFF} \\ & if \ V_{OFF} < V_C < V_{ON} \ then \\ & R_s = \exp \Bigg[ \ L_M + 3L_R \frac{V_C - V_M}{2V_D} - 2L_R \bigg( \frac{V_C - V_M}{V_D^3} \bigg)^3 \bigg] \\ & if \ V_{ON} < V_{OFF} \ \& \ if \ V_C \le V_{ON} \ then \ R_s = R_{ON} \\ & if \ V_C \ge V_{OFF} \ then \ R_s = R_{OFF} \\ & if \ V_{OFF} > V_C > V_{ON} \ then \\ & R_s = \exp \Bigg[ \ L_M - 3L_R \frac{V_C - V_M}{2V_D} + 2L_R \bigg( \frac{V_C - V_M}{V_D^3} \bigg)^3 \bigg] \\ & \exists e \ L_M = \ln \sqrt{R_{ON}R_{OFF}} \ ; \ \ L_R = \ln \frac{R_{ON}}{R_{OFF}} \ ; \ \ V_M = \frac{V_{ON} + V_{OFF}}{2} \ ; \ \ V_M = V_{ON} - V_{OFF} \ ; \end{split}$$

if ... then – логічна умова типу «якщо ... то», & – логічна операція «І».



Рис. 3.47 Елементарна схема перемикання на ключі S(V-Swich)

Приклади формування функцій перетворення з використанням цих ключів представлені на рис. 3.48 (для чотирьох значень напруги включеного стану VON) та рис. 3.49 (для чотирьох значень напруги виключеного стану VOFF).



Рис. 3.48 Прохідна характеристика при зміні VON



Рис. 3.49 Прохідна характеристика при зміні VOFF

Приклад використання ключів S(V-Swich) в схемі заміщення формувача функції перетворення сенсора потоку та приклади прохідних характеристик

цієї схеми наведені на рис. 3.50. Специфікація компонентів цієї схеми є наступною:

R1=1E5; Vz =0,1;

S1: ROFF=1E12; RON=100; VOFF=-1.5; VON=1.5;

S2: ROFF=1E12; RON=30; VOFF=-1.5;

S2: VON = 1.8 (1), 2.0 (2), 2.4 (3), 2.8 (4).



Рис. 3.50 Схема заміщення формувача функції перетворення сенсора потоку та приклади його прохідних характеристик

Бачимо, що отримані прохідні характеристики такої схеми заміщення доволі просто можуть модифікуватися, а відтак, використовуватися для формування функції перетворення в SPICE моделях сенсорів потоку.

# 3.8. Висновки до розділу 3

На основі проведеного аналізу показано, що актуальною проблемою розроблення САПР компонентів систем акустометрії є інтегрування математичних моделей електро-акустичних перетворювачів в системи схемотехнічного моделювання, зокрема SPICE. Таке інтегрування забезпечує можливість комплексної параметричної оптимізації акустометричних перетворювачів сигналів.

Розроблено новий метод синтезу SPICE моделей акустичних компонентів, що відрізняється від відомих поєднанням в структурі єдиної макромоделі параметрів електричного та акустичного імпедансів. Така макромодель поєднує структури MEMS мікрофонів, що виконують функцію вимірювального перетворення тиску (P-Probe), та MEMS теплових сенсорів потоку, що виконують функцію вимірювального перетворення швидкості потоку (U-Probe) повітря. Представлено п'ять етапів синтезу макромоделі електро-акустичних перетворювачів.

Для випромінювачів звукових коливань, зокрема, гучномовців перший каскад моделі представляє імпеданс електричного перетворення, а другий каскад – імпеданс акустичного перетворення. Електричне перетворення специфікуються індуктивністю ємністю та паразитною котушки електромагнітної системи гучномовця чи іншими реактивними колами формувача активуючого сигналу підсилювачів потужності, фільтрів. трансформаторів. Натомість, узгоджуючих акустичне перетворення специфікується динамічними та резонансними характеристиками дифузора, геометрією корпусу та його фазоінверторів. Визначальним в таких синтезованих SPICE моделях є представлення реактивними RLC колами, як електричного, так і акустичного імпедансу. Для цього акустичну механічну систему заміщують електричними колами, що слугують формальними аналогами акустичного імпедансу. Для приймачів (сенсорів) звукових коливань, зокрема, мікрофонів, послідовність синтезу SPICE моделі є зворотною – перший каскад специфікує акустичне перетворення, зокрема, імпеданс рухомої мембрани ємнісного вимірювального перетворювача тиску повітря, а другий – електричне перетворення, зокрема імпеданс сигнального кабелю та вхідного кола підсилювача.

#### **РОЗДІЛ 4**

## МОДЕЛІ СИГНАЛЬНИХ ТРАКТІВ СИСТЕМ АКУСТОМЕТРІЇ

У четвертому роділі розглянуто структурно-функціональні схеми перетворення та аналізу сигналів у системах акустометрії. Зокрема, деталізовано метод структурно-функціонального синтезу вбудованої системи основі селективного підсилення заряду 3 кореляційним на (мультиплікативним) i перетворенням квадратурним (знаковим) детектуванням [8, 9, 24, 40]. Окрему увагу приділено оптимізації сигнального тракту для підвищення завадостійкості та точності вимірювання [33, 43, 48].

#### 4.1. Постановка задач

Процес розроблення систем акустометрії є комплексним та включає в себе певну послідовність взаємозв'язаних етапів. Відповідно до поставлених задач (розділ 2 дисертаційної роботи) у цьому розділі представлені основні результати науково-прикладних робіт, що охоплюють:

- вибір методів та моделей функціонального аналізу сигнальних трактів акустометрії;
- розроблення моделі симулятора віртуальних сигналів Data@Sim для удосконалення методів перетворення сигналів та верифікації моделей САПР акустометрії;
- розроблення методу оптимізації процесу перетворення сигналів за критерієм просторової та частотної селективності;
- синтез схем сигнальних трактів та їх параметричний аналіз.

# 4.2. Основні методи та SPICE макромоделі функціонального аналізу

Як це вже відзначалось (розділ 2) основними методами функціонального та параметричного аналізу в більшості САПР сигнальних трактів, зокрема в системах SPICE, LTSPICE, QSPICE, MicroCAP тощо є: Transient Analysis – часовий аналіз та дослідження перехідних характеристик; AC Analysis – аналіз

за змінним струмом та дослідження частотних характеристик; DC Analysis – аналіз за постійним струмом та дослідження прохідних характеристик. Для підвищення інформативності та ефективності функціонального та параметричного дослідження сигнальних трактів в низці цих систем передбачено широкий перелік засобів математичного аналізу, зокрема, з використанням логічних та статистичних функцій, комплексного числення, Фур'є перетворення тощо. Ілюстрація бібліотек засобів математичного аналізу в сучасних версіях SPICE сумісних систем модельних досліджень представлено на рис. 4.1.

З метою вирішення поставлених задач у дисертаційному дослідженні використовували не тільки вищезгадані засоби математичного аналізу, але і спеціалізовані макромоделі, які реалізують методи математичного аналізу з врахуванням неідеальності функціональних компонентів сигнальних трактів.

Transient Analysis Limits - 🗆 🗙					
Run Add Delete Expand Stepping PSS Properties.	Help 🔟 🚨			SUM	
Time Range 20m Run Options Normal 👻				AVG	
Maximum Time Step 1u State Variables Zero 👻	C	omplex	>	DD	
Number of Points 51  V Operating Point  Accumulate	e Plots F	ourier	>	00	
Temperature Linear 🔽 27 🔽 Operating Point Only 🗌 Fixed Time	Step (	Calculus	>	SD	
Retrace Runs 1 🔽 Auto Scale Ranges 🗌 Periodic St	eady State g	lessel	>	DER	
Innore Expression Errors Page P X Expression Y Evone	ssion	arias		RMS	
	Evened	enes	<i>´</i>	SDT	
	Expand	Aiscellaneous	>	DDT	
	Expand Lists E	loolean	>	001	
🛇 📖 🔲 🛄   2   T (9)	Variables >	rigonometric	>	RE	
🛇 🛄 🔲 3 T V(10)	Constants >		>	IM	
	Symbolics >			MAG	
	Functions > L	ogarithmic / Exponential	,	MAG	
	Operators > F	olynomial	>	HYPOT	
Defines the expression for the Y-axis. Click the right mouse button for a variable me	Curve > L	ambert	>	P	
	Buffers	Digital	>	GD	
		2			

Рис. 4.1 Ілюстрація бібліотек засобів математичного аналізу в сучасних

версіях SPICE сумісних системах модельних досліджень Зокрема, ефективними математичними функціями для аналізу сигналів з їх диференціюванням та інтегруванням (за часом)  $\epsilon$ : DER(u,x) - Calculates the analytical derivative of u with respect to x; SUM(y,x[,start]) - Running integral of y with respect to x, with optional start parameter; SDT(y[,start]) - Running integral of y with respect to T (Time); DDT(y) - Numerical derivative of y with respect to T (Time). Натомість параметри макромоделей перетворення сигналів на основі цих функцій, зокрема Differentiator Macro (рис. 4.2) та Integrator Macro (рис. 4.3) можуть модифікуватися, що властиво, і забезпечує можливість проводити не лише функціональні (якісні), але і параметричні (кількісні) дослідження.

Приклад модельного дослідження ідеалізованого процесу взаємного перетворення «диференціювання (Dif) – інтегрування (Int)» для ступінчатого сигналу S представлено на рис. 4.3, а відповідного дослідження з врахуванням факторів неідеальності (зокрема, перехідних процесів, обмеження роздільної здатності сигнальних трактів, нелінійні перетворення, завад, інтерференцій тощо) – на рис. 4.4.



## Рис. 4.2 Макромодель Differentiator Macro



Рис. 4.3 Макромодель Integrator Macro



Рис. 4.4 Ідеалізований процес взаємного перетворення

Приклад модельного дослідження сигналів, що характеризують неідеальність процесів вищезгаданого взаємного перетворення Dif – Int з відображенням похибки (Error) перетворення, представлено на рис. 4.5. Є очевидним, що представлена похибка перетворення відображає лише доволі абстрактні параметри компонентів сигнального тракту. Відтак, дослідження такого типу здебільшого становлять основу лише параметричного аналізу. Натомість, кількісний аналіз похибок перетворення сигналів та оптимізація сигнальних трактів систем акустометрії, мова про які піде в подальших підрозділах, потребує точніших SPCE моделей компонентів цих трактів, зокрема спеціалізованих моделей операційних підсилювачів.



Рис. 4.5 Похибка взаємного перетворення з врахуванням факторів неідеальності сигнального тракту

Далі розглянемо низку функціональних компонентів та їх SPICE макромоделі, що будуть використовуватися під час аналізу сигнальних трактів акустометрії. Зокрема, для задач елементарного детектування сигналів чи попереднього нормування напруг сигналів перед їх логарифмуванням (для представлення в логарифмічному масштабі в децибелах - дБ), використовуємо макромодель виділення абсолютних значень ABS Macro (рис. 4.6).



Рис. 4.6 Приклад використання макромоделі ABS Macro

З метою синтезу шумів використовуємо два типи моделей - Noise Macro (рис. 4.7) та Voltage Source (універсальне джерело напруги) з конфігуруванням Noise (рис. 4.8). У першому з них використовується алгоритм генерування випадкових чисел в діапазоні VS з часом обновлення даних TS. Значення напруги, що генеруються цим джерелом є завжди додатними. Такий алгоритм є зручним для подальшого представлення даних у шкалі дБ (виключається похибка щодо логарифмування від'ємних чисел). Однак, певним недоліком макромоделі Noise Macro є поява постійного зміщення (усереднення генерованих додатних випадкових чисел), що призводить до спотворення сумарного сигналу типу off-set.



Рис. 4.7 Специфікація моделі Noise Macro

163

🕂 Voltage Source			×			
Name Value Value Change Show						
Display Pin Markers Pin Names Pin Numbers Current Power Condition Border Display Fill Display						
PART=Vnoise			Voltage vs. Time			
VALUE=DC 0 AC 1 0 Noise 10u 1 0	10					
POWER= SHAPEGROUP=Default PACKAGE=			+ Vnoise			
OK Cancel Font	Add Delete	Browse Default Settings				
New Find Plot	Syntax IBIS	Help Save Settings				
🔽 Enabled 🔽 Help Bar						
None   Pulse   Sin   Exp   PWL   SFFM Noise   Gaussian   Define						
DC 0	AC magnitude 1	AC Phase 0				
Interval 10u	Amplitude 1	Start Time 0				
End Time 1	Seed 0					

Рис. 4.8 Специфікація моделі Voltage Source в режимі Noise

Друга з вище згаданих моделей Voltage Source -> Noise формує випадкові значення напруг в діапазоні +/-А (Amplitude) відносно початкового значення DC Value. За DC = 0 формується двополярна напруга без постійного зміщення. Крім того, це джерело має низку інших переваг, зокрема, можливість встановлення інтервалу часу генерування шуму Start Time – End Time, а також можливість відтворення попередньо згенерованого масиву випадкових чисел (режим Seed).

Під час виконання задач модельного дослідження сигналів акустометрії використовують метод швидкого перетворення Фур'є FFT. Використання цього методу передбачає послідовність певних етапів та налаштувань робочих панелей керування процесами досліджень, що представлено на рис. 4.9 та рис. 4.10.



Рис. 4.9 Компоненти налаштування дослідження типу FFT

Properties for Fourier:Harm(V(1))	)	Properties for Fourier:Harm(V(1)) X				
Plot Scales and Formats Co Curves	Iors, Fonts, and Lines   Scope   Fourier   Numeric Output   Tool Bar   Tibe Hamn(V(1))	Plot Scales and Formats Colors, Curves Harm(V(1))	Fonts, and Lines   Scope   Fourier   Numeric X	C Output   Tool Bar   Y Range Low  1e-6 Banne Hich  0.0001		
	Prot Lange I Vent To Rot C Harm C dB(Harm) C Real C THD C Harm C dB(Harmn) C Imag C IHD C Phase Reference Frequency Expression V(1)		Rod Spacing         100           Bold Grid Spacing         0           Scale Factor         None           Scale Factor         Auto           Scale Units         Auto           Scale         Format           1 Digit Scientific         Cursor	Grid Spacing     10       Gold Grid Spacing     0       Scale Factor     None       Scale Units     Auto       Scale     Format       1 Digt Scientific       Cursor     Format       3 Digt Scientific		
_AddDelete	Window Rectangular	Same Y Scales for Each Plot Gro	Auto Scale  Log Auto/Static Grids F Log F Log	Auto Scale      Log     Auto/Static Grids     Same     Use Common Formats     Common Y Scale		

Рис. 4.10 Панелі специфікації дослідження типу FFT

Типово результат отримують послідовністю: Transient -> Fourier Windows -> Add Fourier Window -> Show Harm -> Style -> Popsicle, a у вікні Properties for Fourier.Harm задають вивід результату What To Plot -> Ham чи дБ(Ham). Приклад результатів дослідження типу FFT сигналу у вигляді білого шуму з використанням моделі Noise Macro при VS = 1 B, TS – 1E-4 с представлено на рис. 4.11.



Рис. 4.11 Приклад результатів дослідження типу FFT: лінійна (зверху) та логарифмічна (знизу) шкала

Для синтезу сигналів, що містять як основні гармоніки, так і білий шум використовують послідовне з'єднання відповідних джерел. Крім того, як це показано на рис. 4.12 та рис. 4.13, спектр шуму можна змінювати, тобто формувати колірний шум (синій, рожевий, коричневий тощо). Для цього використовують фільтри. На вищезгаданих рисунках представлено використання елементарного RC фільтру. Далі у роботі цей спосіб формування колірного шуму адаптується під задачі перетворення сигналів акустометрії.



Рис. 4.12 Приклад синтезу колірного шуму з домінуючою гармонікою



Рис. 4.13 FFT перетворення колірного шуму з домінуючою гармонікою

I на завершення короткого анонсу SPICE моделей, що використовувалися під час виконання даної дисертаційної роботи, далі представлено приклад використання синтезатора фільтру Active Filter Designer. У задачах акустометрії найбільш актуальними є фільтри типу Octave та Octave/3, що обумовлює доцільність використання в сигнальних трактах активних фільтрів типу Bandpass Butterworth Sallen-Key. У цьому прикладі використовується фільтр Butterworth другого порядкуOrder = 2 з специфікацією Specification -> Mode 2, центральною частотою Center Frequency  $F_0 = 1E3$  Гц, добротністю Q = 2 (рис. 4.14).



Рис. 4.14 Вікно синтезу фільтру Active Filter Designer

Демонстрація дослідження такого фільтра з описом макромоделлю X1 – B\_B\_S\_1000.MAC розглядається на прикладі частотно-залежного подільника напруги джерела V1 на пасивних компонентах C1, L1, R1, R2, R3 (рис. 4.15). Верхня діаграма демонструє залежність АЧХ такого подільника (напруга V(1)) від ємності C1 = 1E-4, 1E-5, 1E-6 Ф, а нижня – АЧХ після фільтрування (напруга V(2)).



Рис. 4.15 Приклад використання фільтру Active Filter Designer

Можна спостерігати приклад результату виділення інформативних сигналів, характерних для задач акустометрії, і зокрема, якість частотної селекції при вимірюванні АЧХ акустики приміщення. Можливість такої частотної селекції визначається, як самою АЧХ, а саме крутизною її зміни та наявністю акустичних резонансних явищ, так і параметрами фільтру, за результатами перетворення сигналів якого проводиться розрахунок частотних особливостей акустики досліджуваного приміщення. Як слідує з наведеного прикладу така можливість є обмеженою.

Є очевидним, що при значних нерівномірностях АЧХ висока якість частотної селекції забезпечується лише при використанні особливо вузькосмугових фільтрів. Однак, враховуючи реальну інформативність вхідного сигналу, як з точки зору розподілу енергії акустичних коливань в заданій смузі, так і наявності в сигналі завад та шуму, методи акустометрії з використанням лише фільтрів характеризуються значними обмеженнями. Саме цей висновок обумовлює необхідність подальшого розвитку акустометрії, зокрема базуючись запропонованому у цій роботі методі векторної імпульсної акустометрії з набором моночастотних коливань.

# 4.3. Схема заміщення та використання моделі симулятора віртуальних сигналів Data@Sim

Призначення та функціональність симулятора віртуальних сигналів Data@Sim детально представлені на рис. 2.10 в розділі 2 дисертаційної роботи. Вхідними параметрами задаючих сигналів першої групи є набір характеристичних частот звукового діапазону (Frequency set) та специфікація білого шуму (White noise). Їх формують універсальним джерелом Voltage Source - Vs, макромодель якого передбачає можливість вибору типу сигналу – Pulse, Sin, Exp, PWM, SFFM та вищезгадану можливість формувати масиви випадкових значень білого шуму – Noise (рис. 4.16).



Рис. 4.16 Панелі специфікації моделі Voltage Source

Параметри другої групи - встановлення звукових коливань (Transition time), їх затухання (Attenuation set) та відбиття (реверберація) задаються схемами заміщення (рис. 4.17, рис. 4.18), що містять джерело початкової активації Vp, матрицю МТ компонентів формування часових параметрів та суматор Xsum. Матриця МТ містить лінії затримки Xt, атенюатори Xa та реактивні RC кола. Реактивні кола виконують функцію диференціювання задаючих імпульсів, що формує функцію затухання звукових коливань, та їх інтегруванння, що формує інерційність процесу активації цих коливань. Кількість компонентів цієї матриці визначається специфікою досліджень, зокрема кількістю поверхонь відбивання хвиль.



Рис. 4.17 Макромодель встановлення та відбиття звукових коливань



Рис. 4.18 Макромодель затухання звукових коливань

Мультиплікативну функцію між даними першої да другої груп виконують помножувачі Ха та Хт. На вихідний сигнал цього перемножувача накладається шум, що реєструється в приймальних трактах системи вимірювання (BG Noise) та завади (Interference). Цю функцію виконують джерела Xn0 та Vnoise. Для зручності подальшого аналізу, зокрема логарифмування сигналів, на виході схеми використано вищезгадану макромодель ABS Macro.

Початковий (мінімальний) рівень сигналу та роздільна здатність перетворення сигналів, що обумовлені розрядністю аналого-цифрових перетворювачів та коефіцієнтами нормування даних відповідно до системи числення (Zero level) задається джерелом Vo0 та Vm0. Його присутність в схемі є обов'язковою, адже без початкового рівня вихідний сигнал може приймати нульові значення, що неприпустимо з точки зору його подальшого представлення в децибелах логарифмічної шкали. Крім того, з цієї ж причини компонентом Xabs формуються модульні значення сигналу на виході синтезатора Out.

Приклади візуалізації сигналів, що демонструють етапи та результати їх синтезу, представлено на рис. 4.19 – рис. 4.25. Для простоти візуалізації розглянуто тільки три складові відбитих звукових хвиль.



Рис. 4.19 Сигнали під час їх формування (Stage 1)



Рис. 4.20 Сигнали під час їх формування (Stage 2)



Рис. 4.21 Сигнали під час їх формування (Stage 3)



Рис. 4.22 Сигнали під час їх формування (Stage 4)



Рис. 4.23 Сигнали під час їх формування (Stage 5)



Рис. 4.24 Приклади синтезованих сигналів (var.1, 2, 3)



Рис. 4.25 Приклади синтезованих сигналів (var.4, 5, 6)

Перейдемо до розгляду принципу побудови схеми заміщення моделі Data@Sim, що формує частотні характеристики імітаційних сигналів. Реалізація частотно-селективних схем є доволі рутинною інженерною задачею, а тому дамо лише два характерні приклади її побудови. У першому варіанті використовується послідовна структура з наборів фільтрів (рис. 4.26), а в другому – паралельна структура з суматором на (рис. 4.27) на основі макромоделі Function Source - Formula type voltage (рис. 4.28).



Рис. 4.26 Схема заміщення моделі Data@Sim, формування АЧХ (var. 1)



Рис. 4.27 Схема заміщення моделі Data@Sim, формування АЧХ (var. 2)

NFV:Analog behavioral voltage source (E.g. VALUE=I(R2)*V(3,4)^2)     Name     VALUE     VALUE     VALUE     VALUE     VALUE     VALUE     VALUE     Pin Namkers     Pin Names     Pin Numbers     Current     Power     PART=ES     VALUE=2(0)+V(10)+V(1)+V(1)+V(1)     REQ=     DERIVATIVE=Default     SMODITANG=N0     RRACTION=.1     CONTE:     SHAPEGROLP=Default     SHAPEGROLP=Default	Function Source - Formula type voltage Schematic format: PART attribute: <ambr></ambr> charace This attribute defines the part name. Examples: Funct1 NFV1 VALUE attribute: <formula> This attribute defines the nonlinear function <u>expression</u>. Examples: Uo*Cox*Wid/Len*((Vgs1-VT1)_{Vds1/2}))*Vds1*(1+Lam*Vds1) 1.5+2*sin(2*PI*1E6T)+25*IB(Q1)</formula>
SMAPEGROLP-Default           OK         Cancel         Font         Add         Delete         Browse           New         Find         Plot         Syntax         BIS         Help           VF         Enabled         VF         Help Bar         File	1.5+2°sin(2*P)*IE6*()+25*IB(2(1) FREQ attribute: [ <fexpr>] This attribute defines the AC value. The value may be a constant or it may be a dynamic: expression. This attribute only affects AC analysis. Transient analysis will use the VALU Examples: V(10)*sqrt(f) [i(R1)*(f1000)</fexpr>

Рис. 4.28 Макромодель Function Source (Formula type voltage)

Практична реалізація другого варіанту є суттєво простішою, як під час початкового підбору параметрів компонентів мультикаскадного фільту, так і в подальшому під час верифікації та корекції параметрів моделі Data@Sim. Приклади синтезу та корекції АЧХ з демонстрацією характерних для акустометрії резонансних явищ, наведено на рис. 4.29 та рис. 4.30.

I на завершення короткого викладу методу та етапів синтезу моделі симулятора віртуальних сигналів Data@Sim на рис. 4.31 демонструється фрагмент текстового файлу з масивом даних Waveform Values. Далі ці дані, як це висвітлено в розділі 2, використовують для розробки та верифікації нових методів перетворення сигналів в задачах акустометрії.



Рис. 4.29 Приклади АЧХ під час корекції



Рис. 4.30 Приклади АЧХ під час корекції

******	******	Waveform Values		
* * *	Micro-Cap 11.2.0.3 (64 bit)	=================		
***		т	V(5)	dB(V(5))
* * *		(Secs)	(V)	
***	Transient Analysis of MM_RT_1	0.000E+00	1.000E-03	-6.000E+01
* * *	28.05.2024 14:26:43	1.000E-04	3.663E-04	-6.872E+01
Limits		2.000E-04	7.400E-04	-6.262E+01
=====		3.000E-04	7.404E-04	-6.261E+01
Time Range	1	4.000E-04	1.465E-06	-1.167E+02
Maximum Time Step	3E-5	5.001E-04	4.088E-04	-6.777E+01
Number of Points	10000	6-001E-04	9.7098-04	-6.026E+01
Petrace Pupe	1	7 001E-04	6 251 -04	-6 2948+01
Run Options	Normal	7.001E-04	7 E40R-04	-C. 2452+01
State Variables	Zero	8.001E-04	7.5462-04	-0.2452+01
Operating Point	On	9.001E-04	2.233E-04	-/.303E+01
Operating Point Only	Off	1.000E-03	6.775E-04	-6.338E+01
Auto Scale Ranges	On	1.100E-03	4.933E-04	-6.614E+01
Accumulate Plots	Off	1.200E-03	8.086E-04	-6.185E+01
Fixed Time Step	off	1.300E-03	4.978E-04	-6.606E+01
Periodic Steady State	Off	1.400E-03	4.255E-04	-6.742E+01
Ignore Expression Errors	Off	1.500E-03	5.100E-04	-6.585E+01

Рис. 4.31 Демонстрація виводу числових даних з симулятора віртуальних

#### 4.4. Метод оптимізації процесу перетворення сигналів

Параметричний аналіз та оптимізація сигнальних трактів є доволі складною та об'ємною задачею, як за характером дослідження, так і послідовністю викладу всіх етапів. Переважно такі дослідження проводять типовими методами на інженерному рівні. Тому їх виклад в цій роботі не наводиться. Натомість, в рамках розроблюваного нового методу векторної імпульсної акустометрії з набором моночастотних коливань, розглянемо сформульовану в розділі 2 проблему оптимізації процесу перетворення сигналів за критерієм компромісу між просторовою та частотною селективністю.

Просторова роздільна здатність формується методами та засобами вимірювання параметрів ехо-сигналів. Високі значення цього параметру досягаються можливістю високоточної часової селекції відбитих імпульсів звукових коливань, адже ехо-сигнал не повинен накладатися на імпульс випромінювання. Відтак, визначальною є необхідність мінімізації тривалості цих імпульсів.

Однак, частотна селективність визначається співвідношенням сигналшум та методом завадостійкого вимірювального перетворення. Цей метод базується на використанні кореляційних чи автокореляційних функціональних перетворень, що передбачає збільшення часу інтегрування результатів цих перетворень, а відтак – збільшення тривалості імпульсів звукових коливань.

Вирішення цього протиріччя лежить в основі запропонованого в цій роботі методу оптимізації з аналізом функції залежності ширини W<sub>P</sub> імпульсу звукових коливань від параметрів процесу формування сигналу:

$$W_P = f(F_0, F_{IF}, \tau, S, S/N, t_{MINR}, [E]),$$

де: F<sub>0</sub> – частота звукового коливання; F<sub>IF</sub> – частота інтерференції; τ – характеристичний час встановлення (спаду) звукових коливань; S – потужність сигналу; S/N (Signal-to-Noise Ratio) – співвідношення сигнал-шум; t<sub>MINR</sub> – мінімальний час першого інформативного відлуння; [E] – матриця параметрів сигнального тракту. Викладення суті та послідовності реалізації вказаного методу розпочнемо з синтезу імпульсів моночастотних коливань, в яких врахована, як часова складова - постійна релаксації процесу їх встановлення, так і стохастична складова - шуми та завади. Послідовність синтезу таких імпульсів представлено на рис. 4.32 – рис. 4.34.

Моночастотний сигнал з можливістю динамічного вибору амплітуди, частоти та фази специфікується джерелом Vs, а тривалість встановлення імпульсу – джерелом Vp та реактивним колом, зокрема в першому наближенні – пасивною інтегруючою ланкою на компонентах R1, C1. Формування вихідного сигналу реалізується помножувачем – макромоделлю X1. Далі, з використанням джерел Voff та Xnoise, в сигнал вводиться складові початкового рівня (зміщення off-set) та стохастичних процесів (рис. 4.35).



Рис. 4.32 Формування імпульсу без врахування релаксації



Рис. 4.33 Формування імпульсу з врахуванням релаксації



Рис. 4.34 Формування імпульсу з врахуванням шумів

Voff —I	Xnoise
雇 Battery	K Noise:Noise Source Macro
Name         Value           VALUE         In Show           Display         In Show           In Pin Markers         Pin Names           In Pin Markers         Pin Names	Name         Value           Param:VS         □ Show           Display         □ Pin Markers □ Pin Names
PART=Voff VALUE==0,25 COST = POWER = SHAPEGROUP=Default PACKAGE =	PART=Xnoise FILE=Noise SHAPEGROUP=Default ParemtS=1E=5 ParemtVS=0.5 PACKAGE= COST = POWER =

Рис. 4.35 Специфікація джерел Voff та Xnoise

I завершальними стадіями формування сигналу є їх детектування з використанням макромоделей X2 ABS Macro – отримання абсолютних значень та Xint Integrator Macro – інтегрування за часом (рис. 4.36).



Рис. 4.36 Макромодель з детектуванням абсолютного рівня сигналу

Отриманий результат формування та подальшого перетворення сигналу представлено на рис. 4.37, де напруга V(6) та V(7) – сигнал до та після (ABS) детектування абсолютних значень, а V(8) – результат його інтегрування. Можна спостерігати високу нестабільність процесу такого детектування, що слідує з паразитних приростом напруги на виході інтегратора після завершення імпульсу (в часі t > 1.3E-2 с). Зрозуміло, що причиною такої нестабільності є наявність на вході інтегратора абсолютних значень стохастичного процесу.



Рис. 4.37 Результат детектування абсолютного рівня сигналу

З метою вирішення вказаної проблеми, відповідно до запропонованого методу завадостійкого вимірювального перетворення, інформативний сигнал формують кореляційною чи автокореляційною функцією. Таке перетворення здійснюється помноженням отриманого в ході вимірювання відбитого акустичного сигналу з завадами (вимірювання ехо-сигналу після завершення випромінювання активатором звукових коливань) на його базову складову без завад. Ця базова складова отримується від задаючого генератора активатора звукових коливань (кореляційний метод) чи вимірюється при високому співвідношенні сигнал-шум (автокореляціний метод) В інтервалах випромінювання звукових коливань. Далі результат такого перемноження інтегрують, і що є принципово важливим – інтегрування здійснюють без попереднього формування абсолютних значень сигналу.

Макромодель з кореляційним детектуванням сигналу, в якій передбачена можливість співставлення результатів завадостійкого детектування з результатами вище розглянутого базового методу детектування з виділенням абсолютних значень, наведено на рис. 4.38, а результат співставлення форми сигналів MUL (з перемноженням) та ABS (з формуванням абсолютних значень) при відсутності завад (Noise = 0) – на рис. 4.39.



Рис. 4.38 Макромодель з кореляційним детектуванням сигналу



Рис. 4.39 Співставлення форми сигналів MUL та ABS при Noise = 0

Результати модельних досліджень сигналів з кореляційним детектуванням сигналу наведено на рис. 4.40. Можна бачити, що на вхід інтегратор надходять не абсолютні (ABS) значення сигналу, а двополярні значення результату перемноження вхідного сигналу та його базової складової (напруга V(9)). Відтак, сигнал на виході інтегратора (напруга V(10)) в першому наближенні залишається сталим після завершення імпульсу. Співставленням сигналів обох методів INT(ABS) V(8) та INT(MUL) V(10) наведені на рис. 4.41 та рис. 4.42.


Рис. 4.40 Результат кореляційного детектування сигналу



Рис. 4.41 Співставлення ABS V(7) та MUL V(9) сигналів



Рис. 4.42 Співставлення результатів інтегрування сигналів

Ще один характерний приклад результату дослідження методу кореляційним детектуванням сигналу наведено на рис. 4.43. В даному прикладі розглядається варіант сигналу зі значним рівнем постійного зміщення (DC off-set). Можна бачити, що в результаті перемноження значень DC off-set на базову складову сигналу формується двополярне гармонічне коливання, результат інтегрування якого прямує до нуля.



Рис. 4.43 Результат кореляційного детектування сигналу зі значним рівнем постійного зміщення

Однак, є очевидним, що результат такого перетворення сигналів залежить, як від тривалості інтегрування, а отже і тривалості імпульсу звукових коливань, так і спектру завад. Відтак, з метою встановлення закономірностей впливу спектру завад розглянемо специфікацію SPICE моделі сигнального тракту, в якій врахована можливість задавати параметри цих завад. Для цього в схему вводимо джерело формування завад інтерференції хвиль типу Voltage Source Single Frequency FM type (рис. 4.44). Під час специфікації представляється можливим вибрати один з двох типів FM (Frequency Modulation) модуляції – Modulate 1 (рис. 4.45) – Interference #1 та Modulate 2 – Interference #2 (рис. 4.46).

任 Voltage Source		
None   Pulse   Sin   Exp   PW DC 0 VO 2 MI 4	L SFFM Noise Gaussian Define AC magnitude 1 VA 1 FM 100	AC Phase 0 F0 10
Single Frequen           Name         Description           vo or io         Offset value           va or ia         Peak amplitude           f0         Carrier frequency           mi         Modulation index           fm         Modulation freq.	cy FM type Units Default V or A none V or A none Hz 1/TSTOP* 0 Hz 1/TSTOP*	Vinfer +
* TSTOP is the run time.		
The waveform value generated by the SFFM option is as follows (represented as a voltage source): F=vo+va*sin(2*PI*f0*TIME+mi*sin(2*PI*fm*TIME))		
Where TIME is the transient analysis run time.		

Рис. 4.44 Специфікація джерела Voltage Source Single Frequency FM type



Рис. 4.45 Тип модуляції Modulate 1



Рис. 4.46 Тип модуляції Modulate 2

Демонстрація результату дослідження впливу завад на нестабільність сигналу в граничних умовах наведено на рис. 4.47. Ці граничні умови відповідають завадам, значення частот яких  $F_{IF}$  (Interference Frequency) наближається до частоти інформативного сигналу  $F_0$ . В даному прикладі  $F_0 = 1E3 \Gamma \mu$ , а  $F_{IF} = 1E2$ , 1E3, 1E4  $\Gamma \mu$ . Можна бачити, що при  $F_{IF} <> F_0$ , зокрема  $F_{IF} = 1E2$ , 1E4  $\Gamma \mu$  метод кореляційного детектування сигналу забезпечує високу стабільність до завад, однак при наближенні частоти завад до частоти інформативного сигналу  $F_{IF} \sim F_0$  ( $F_0 = 1E3 \Gamma \mu$ ) завадостійкість втрачається. Цей випадок вважається гранично небажаним.



Рис. 4.47 Результат дослідження в граничних умовах

Відтак, саме результати дослідження при наближенні до граничних умов забезпечують найвищу ефективність з точки зору вирішуваної проблеми – оптимізації тривалості імпульсу  $W_P$  за компромісом між просторовою роздільною здатністю та співвідношенням сигнал-завада (сигнал-шум). Демонстрація таких досліджень для двох тривалостей  $W_P$  імпульсу при заданому наборі, зокрема -  $F_0 = 1E3 \Gamma \mu$ ,  $V_{F0} = 1 B$ ,  $F_{IF} = 300 \Gamma \mu$ ,  $V_{IF} = 1 B$ , наведена на рис. 4.48 та рис. 4.49. Частота завади вибрана втричі нижчою за частоту корисного сигналу, що забезпечує хорошу наочність визначення співвідношення сингал-завада. Можна бачити, що з зростанням тривалості імпульсу (у цьому прикладі – тривалість зростає втричі) паразитні пульсації на виході інтегратора зменшуються. Насправді рівень пульсацій залишається тим же, однак такий ефект отримано в врахуванням зміни масштабу, що обумовлено збільшенням значення напруги на виході інтегратора з 5Е-3 до 15 Е-3 В. Тобто, зростання тривалості імпульсу втричі забезпечує таке ж зростання сигналу інтегратора, а відтак втричі зростання співвідношення сигнал-завада.



Рис. 4.48 Результат дослідження завадостійкості при короткій тривалості імпульсу (F<sub>0</sub> = 1E3 Гц, V<sub>F0</sub> = 1 В, F<sub>IF</sub> = 300 Гц, V<sub>IF</sub> = 1 В)



Рис. 4.49 Результат дослідження завадостійкості при короткій тривалості імпульсу ( $F_0 = 1E3 \ \Gamma \mu$ ,  $V_{F0} = 1 \ B$ ,  $F_{IF} = 300 \ \Gamma \mu$ ,  $V_{IF} = 1 \ B$ )

Ця закономірність наочно демонструється на рис. 4.50, де представлено сімейство вихідних напруг інтегратора (сигналів S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>) при заданому наборі значень тривалості імпульсу VP.pulse.pw = 1E-3 (PW<sub>1</sub>), 3E-3 (PW<sub>2</sub>), 1E-2 (PW<sub>3</sub>), 3E-2 (PW<sub>4</sub>). Рівень паразитних пульсацій позначено інтервалом N.



Рис. 4.50 Сімейство характеристик при VP.pulse.pw = 1E-3 (PW<sub>1</sub>), 3E-3 (PW<sub>2</sub>), 1E-2 (PW<sub>3</sub>), 3E-2 (PW<sub>4</sub>) ( $F_0 = 1E3 \ \Gamma \mu$ ,  $V_{F0} = 1 \ B$ ,  $F_{IF} = 300 \ \Gamma \mu$ ,  $V_{IF} = 1 \ B$ )

На завершальному етапі запропонованого методу оптимізації процесу за критерієм компромісу між просторовою та частотною селективністю розглянемо модифіковану макромодель для порівняльного аналізу (рис. 4.51), за допомогою якої проводять визначення абсолютної похибки перетворення сигналів.



Рис. 4.51 Модифікована макромодель для порівняльного аналізу

Абсолютну похибку визначаємо різницевими значеннями між сигналами з врахування та без врахування завад. Для цього в схему заміщення макромоделі вводимо каскад кореляційного детектування опорного сигналу V(11) без врахування завад – помножувач X3 та інтегратор Xint3. Типові приклади досліджень абсолютної похибки перетворення сигналів без кореляційного детектування V(7)-V(11) наведено на рис. 4.52 (Case #1: F<sub>0</sub> = 1E3 Гц, V<sub>F0</sub> = 1 B, F<sub>IF</sub> = 300 Гц, V<sub>IF</sub> = 0,1 B) та на рис. 4.53 (Case #2: F<sub>0</sub> = 1E3 Гц, V<sub>F0</sub> = 1 B, F<sub>IF</sub> = 300 Гц, V<sub>IF</sub> = 1 B), а з кореляційним детектуванням - на рис. 4.54 (Case #1) та рис. 4.55 (Case #2)



Рис. 4.52 Сімейство характеристик вихідного сигналу та абсолютні похибки



Рис. 4.53 Сімейство характеристик вихідного сигналу та абсолютні похибки без кореляційного детектування (Case #2)



Рис. 4.54 Сімейство характеристик вихідного сигналу та абсолютні похибки

з кореляційним детектуванням (Case #1)



Рис. 4.55 Сімейство характеристик вихідного сигналу та абсолютні похибки з кореляційним детектуванням (Case #2)

Наведені результати підтверджують високу ефективність кореляційного детектування сигналів. Зокрема показано, при заданих співвідношенням сигнал-завада абсолютна похибка не перевищує V(9)-V(11) < 2E-6 B (Case #1) та V(9)-V(11) < 2E-4 B (Case #2).

Представлений метод оптимізації процесу перетворення сигналів за критерієм компромісу між просторової селективністю, що визначається тривалістю перехідних процесів та імпульсів активації звукових хвиль, та частотною селективністю, що визначається параметрами завад та ефективністю вимірювального перетворення, становить основу подальшого розвитку акустометрії приміщень, мова про новизну яких йшла в розділі 2 дисертаційної роботи.

#### 4.5. Висновки до розділу 4

Обґрунтована актуальність синтезу SPICE моделей сигнальних трактів систем акустометрії, як етапу комплексу науково-прикладних робіт по розробленню засобів дослідження та покращення акустичних властивостей закритих приміщень. Розглянуто основні методи та макромоделі функціонального аналізу сигнальних трактів, зокрема наведена ілюстрація бібліотек математичного аналізу в сучасних версіях SPICE-сумісних системмодельних досліджень. Представлено етапи модельного дослідження сигналів акустометрії з використанням методу швидкого перетворення Фур'є FFT та синтезатора фільтру Active Filter Designer.

Показано, що за значної нерівномірності АЧХ висока якість частотної селекції забезпечується тільки під час використання особливо вузькосмугових фільтрів. Однак, враховуючи реальну інформативність вхідного сигналу, як з точки зору розподілу енергії акустичних коливань в заданій смузі, так і наявності в сигналі завад та шуму, методи акустометрії з використанням лише фільтрів характеризуються значними обмеженнями. Саме цей висновок обумовлює необхідність подальшого розвитку акустометрії, зокрема базуючись на запропонованому в цій роботі методі векторної імпульсної акустометрії з набором моночастотних коливань.

Представлено етапи та приклади розроблення моделі симулятора віртуальних сигналів Data@Sim, що призначений для удосконалення методів перетворення сигналів та верифікації моделей САПР акустометрії.

Сформульовано протиріччя між вимогами до просторової роздільної здатності та частотної селективності. Просторова роздільна здатність формується методами та засобами вимірювання параметрів ехо-сигналів. Високі значення цього параметру досягаються можливістю високоточної часової селекції відбитих імпульсів звукових коливань, адже ехо-сигнал не повинен накладатися на імпульс випромінювання. Відтак, визначальною є необхідність мінімізації тривалості цих імпульсів. Однак, частотна селективність визначається співвідношенням сигнал-шум та методом завадостійкого вимірювального перетворення. Цей метод базується на кореляційних чи автокореляційних використанні функціональних перетворень, що передбачає збільшення часу інтегрування результатів цих перетворень, а відтак – збільшення тривалості імпульсів звукових коливань.

Для вирішення даного протиріччя в дисертаційній роботі розроблено метод оптимізації процесу перетворення сигналів з аналізом функції залежності ширини імпульсу звукових коливань від параметрів сигналу. Представлено етапи та приклади реалізації цього методу.

#### **РОЗДІЛ 5**

## МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У п'ятому розділі описано спеціалізовані засоби й алгоритми для проведення експериментальних досліджень акустики приміщень [8, 10, 21], а також наведено метод комплексної верифікації процесів та засобів дослідження акустичних параметрів, який уперше запропоновано автором для підвищення достовірності результатів [16, 18, 21, 31, 58]. Проаналізовано етапи налаштування апаратно-програмних комплексів, методи калібрування та оцінювання впливу шумів і нелінійних спотворень [40, 58].

### 5.1. Спеціалізовані засоби досліджень акустики

Під час виконання дисенртаційнорї роботи використовували широкий перелік апаратно-програмних засобів експериментального та модельного дослідження акустики приміщень [27]. В узагальненому вигляді процес та засоби дослідження акустичних параметрів представлено на рис. 5.1.



Рис. 5.1 Узагальнена структура апаратно-програмної системи акустометрії

З погляду на спеціальність, за якою виконувалась дана робота, її об'єктом дослідження є процеси, математичні та інформаційні моделі апаратнопрограмної (Hardware & Software) реалізації систем акустометрії (Acoustic Measurement System), що виконує функції керування процесами вимірювання (Measurement control), формування (Signal formation) та перетворення (Signal processing) сигналів відповідно до спеціалізованих методів та засобів дослідження – актюаторів (Acoustic transducer) та вимірювачів, зокрема широкосмугових мікрофонів (Wideband Microphone) акустичних хвиль. Крім, властиво приміщень, в яких поширюються звукові хвилі, компонентами акустики є спеціалізовані абсорбери та розсіювачі (Acoustic objects).

Експериментальні дослідження проводилися в приміщеннях та лабораторіях Львівської політехніки, аудиторіях та кіно-концертних залах та храмах, зокрема в Національному драматичному театрі імені Марії Заньковецької (Львів) [30], церкві св. Івана Хрестителя (с. Верхня Калуського району, Івано-Франківської області), синагозі "Цорі Ґільод" (м. Львів) та ін. Низка спеціалізованих досліджень проводились у лабораторіях технічної акустики Гірничо-металургійної Академії імені С. Сташица (Польща, м. Краків) [40]. Ілюстрації деяких спеціалізованих приміщень та засобів дослідження наведено на рис. 5.2 – рис. 5.6.



Рис. 5.2 Безехова та ревербераційна камери



Рис. 5.3 Профільовані акустичні поверхні, розсіювач Шредера та приклад розрахунку (<u>https://actools.tunetown.de/prn/</u>) їх форми



Рис. 5.4 Векторний випромінювач з електронікою та комутаторами [19, 48]



Рис. 5.5 Зонд дослідження акустичного імпедансу PU Sound Intensity Probe



Рис. 5.6 Спеціалізовані пристрої вимірювання акустичних параметрів

Дослідження впливу механічних вібрацій на генерування акустичних хвиль та можливості реалізації спеціалізованих конвертерів енергії механічної вібрацій енергію В електричних джерел живлення проводилось 3 використанням спеціалізованих вібраційних перетворювачів. Їх основними компонентами (рис. 5.7) механічна резонуюча пластина (I), € п'єзоелектричний перетворювач (II), конструктив (III), засоби кріплення (IV) та магнітна система (S-N). Приклади дослідження параметрів вібрації, зокрема залежності просторового зміщення (displac.) та вихідної напруги (voltage) від часу представлені на рис. 5.8 [28].



Рис. 5.7 Структура вібраційного перетворювача для дослідження параметрів вібрації та її конвертування в електричну енергію джерел

живлення



Рис. 5.8 Приклади дослідження параметрів вібрації

Спектральний аналіз сигналів під час експериментальних досліджень акустичних параметрів проводили з використанням швидкого перетворення Фур'є FFT (Fast Fourier Transform) та RTA (Real-Time Analyzer) фільтрів, зокрема - 1/1 та 1/3 Octave Band. Використовувалися керовані еквалайзери, зокрема Equalizer APO. На рис. 5.9 представлено конфігурування смугового режекторного фільтра типу Notch filter (band-stop filter) та результат залежності АЧХ від добротності Q factor. Можна бачити, що за високої добротності (зокрема при Q = 10) ширина спектру (частотна селективність), що вирізується цим фільтром (у цьому прикладі формується придушення частоти електромагнітної завади силової мережі  $f_R = 50 \Gamma_{II}$ ) не перевищує 10 % відносно f<sub>R</sub>. При цьому коефіцієнт придушення частоти завади не перевищує  $K_R = -20$  дБ. Натомість, за зменшення добротності (зокрема при Q = 0,33) коефіцієнт придушення зростає до К<sub>R</sub> = - 50 дБ, однак частотна селективність суттєво зменшується – смуга частот, в якій відбувається режекція розширяється приблизно від 20 Гц до 200 Гц. Значною мірою це зауваження є визначальним під час вибору типу фільтрів та аналізу їх ефективності.





Рис. 5.9 Приклад використання еквалайзера Equalizer APO.

Реалізовано підсистему активного шумоподавлення (рис. 5.10), яка забезпечує зчитування звукового сигналу, його опрацювання та відтворення через аудіо виходи. Для цього налаштовали ключові параметри аудіосигналу, такі як частота дискретизації та розрядність квантування. Система дає змогу виконувати запис сигналу протягом заданого інтервалу часу з його збереженням у форматі .wav для подальшого аналізу. Розроблено алгоритми для обробки сигналу, його графічної візуалізації (рис. 5.11), перетворення в децибели та аналіз спектральних характеристик. Впроваджено фазове обертання сигналу, що є основою для подальших досліджень у галузі шумоподавлення та інших напрямків обробки акустичних сигналів.



Рис. 5.10 Інтерфейс підсистеми активного шумоподавлення



Рис. 5.11 Приклади форм досліджуваних сигналів

# 5.2. Вбудована система дослідження акустичних параметрів

Відповідно до основних підходів реалізації розглянутих в розділі 2.4 математичної моделі та програмного забезпечення M-Signal розрахунку ефективності частотної селекції сигналів розроблено вбудовану систему

дослідження акустичних параметрів з умовною назвою AMES – Acoustic Measurement Embedded System (рис. 5.12).



Рис. 5.12 Вбудована система дослідження акустичних параметрів AMES

Її базою є програмована система на кристалі PSoC (Programmable System on Chip, Cypress, Infineon), на основі якої здійснено структурно-алгоритмічну peaлiзацію формування (Configuration) та програмного керування (Control) процесами вимірювання, зокрема встановлення частоти (Frequency), фази (Phase) та гармоніки (Harmonics). Програмно керована система PSoC містить вузли цифрових та аналогових систем, вузли мікропроцесора, матриці енергозалежної та енергонезалежної пам'яті, системні ресурси, а також вузли програмування та керування енергоспоживанням. Серед існуючих серій цих систем вибрали покоління PSoC 5 LP, перевагою якого є широкий набір програмно керованих вузлів змішаного (аналогового та цифрового) перетворення сигналів. Крім PSoC система містить вузи енергоживлення (Power Unit) та підсилення потужності (Power Amplifier) сигналів, які керують актюаторами (Acoustic transducer) акустичних хвиль.

Частотну селекцію реалізовано режимами Mode #N, які охоплюють представлені в розділі 2 методи кореляційного (мультиплікативного)

перетворення Mode A та квадратурного (знакового) детектування Mode Q. Перевагою вбудованої системи AMES також є реалізація вхідного тракту змішаного перетворення сигналів (Mixed Signal Front-End) на основі методу селективного підсилення заряду (Selective Charge Amplifier). Перевагою такого методу перетворення сигналів є забезпечення високого рівня завадостійкості вимірювання інформативного сигналу у вигляді зміни електричного заряду п'єзоелектричними перетворювачами.

Як буде показано далі, метод селективного підсилення заряду базується на ефекті Міллера і реалізує перетворення типу «заряд-напруга» з високим рівнем завадостійкості відносно дестабілізуючих факторів, зокрема паразитної ємності структури п'єзоелектричних перетворювачів та сигнальної лінії (екранованого чи коаксіального кабелю). Особливо ефективний цей метод перетворення сигналів є в системах дослідження низькочастотних вібрацій, в яких точність вимірювання з використанням традиційних мікрофонів є доволі низькою.

Основні вікна програмного забезпечення вбудованої системи AMES представлено на рис. 5.13. Під час вимірювання у вікні AMES Control проводиться вибір вищезгаданих режимів - Mode #1, #2, #3, частоти (Frequency), гармоніки (Harmonics) та фази (Phase). Крім того, передбачено керування коефіцієнтом підсилення сигналу в колі між підсилювачем заряду та аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) - PGA Gain. Цикли вимірювання та візуалізації отриманої інформації відбуваються вибором періоду Period, а збереження чи стирання результатів – командами Data save та Clear.

Результати вимірювань графічно представлено у вікнах:

- Wave Actuator епюри сигналів активації акустичних хвиль;
- SAR oscilloscope епюри сигналів реального часу, що оцифровуються швидким АЦП типу SAR ADC (Successive Approximation Register Analogto-Digit Converter);
- Measurement data результати вимірювання відповідно до обраного методу та режимів вимірювання.

Приклади режимів вимірювання Mode AMES та форми, зокрема сигналів активації акустичних хвиль за Case #1 (Harmonic #1, Ph = 0), Case #2 (Harmonic #1, Ph = 30), Case #3 (Harmonic #2, Ph = 0), Case #4 (Harmonic #2, Ph = 60), представлено на рис. 5.14.



Рис. 5.13 Основні вікна програмного забезпечення АМЕЅ



Рис. 5.14 Приклади режимів вимірювання Mode AMES

Основними програмно-керованими вузлами вбудованої системи AMES, що входять в PSoC 5 LP (рис. 5.15) є таймери Timer, генератор із програмованою формою вихідного сигналу Wave DAC (рис. 5.16), швидке AЦП типу SAR ADC, високопрецизійне AЦП типу DelSig ADC (Delta-Sigma Analog-to-Digit Converter), операційні підсилювачі Оратр, аналоговий комутатор A Mux, регістр керування Control Reg, джерело опорної напруги Vref (Reference Voltage Generator) та асинхронний інтерфейс типу UART. Фрагменти програмного коду AMES представлено на рис. 5.17.



Рис. 5.15 Основні вузли вбудованої системи АМЕЅ



Рис. 5.16 Вікно конфігурування Wave DAC

```
152 void uart_test()
                                                   230
                                                        void pga conf()
153 🖂 {
                                                   231
                                                       - {
154 | test16=(UART BYTE[1]<<8) + UART BYTE[2];</pre>
                                                   232
                                                         switch(UART BYTE[1])
155
    TEST[0] = UART_BYTE[0];
                                                   233
    TEST[1] = test16>>8;
156
                                                   234
                                                              case 1:
157
     TEST[2]= test16;
                                                   235
                                                                PGA_1_SetPower(PGA_1_MINPOWER);
158
     UART PutArray(TEST, 3);
                                                   236
                                                                break;
159 L}
                                                   237
                                                           case 2:
160
                                                                 PGA_1_SetPower(PGA_1_LOWPOWER);
                                                   238
161
                                                   239
                                                                break;
162 void usDelay set()
                                                   240
                                                           case 3:
163 🖂 {
                                                   241
                                                                PGA_1_SetPower(PGA_1_MEDPOWER);
    usDelay=(UART_BYTE[1]<<8) + UART_BYTE[2];
164
                                                   242
                                                                break;
165 -}
                                                   243
                                                           case 4:
166
                                                                 PGA 1 SetPower (PGA 1 HIGHPOWER);
                                                   244
167
     void timer_set()
                                                   245
                                                                break:
168 🖂 {
                                                   246
                                                            case 5:
    timel_16=(UART_BYTE[1]<<8) + UART_BYTE[2];</pre>
169
                                                   247
                                                                 PGA 1 SetGain(PGA 1 GAIN 01);
170
     Timer_1_WritePeriod(timel_16);
                                                   248
                                                                 break:
171
```

Рис. 5.17 Фрагменти програмного коду AMES

Як зазначали раніше, основним спеціалізованим вузлом вхідного тракту змішаного перетворення сигналів є підсилювач заряду (рис. 5.18), метод перетворення сигналів якого забезпечує перетворення типу «заряд-напруга» з високим рівнем завадостійкості відносно дестабілізуючих факторів. Сформований п'єзоелектричним перетворювачем QT з електричною ємністю  $C_{QT}$  заряд Q, що є інформативною величиною вимірювального перетворення звукових хвиль чи механічних вібрацій подається через сигнальну лінію TL на вхід підсилювача заряду (напруга V<sub>IN</sub>). Дестабілізуючими чинниками процесу вимірювання є, зокрема паразитні ємності C<sub>P1</sub> та C<sub>P2</sub>.



Рис. 5.18 Функціональна схема підсилювача заряду

Метод перетворення сигналів в такому підсилювачі заряду полягає у формуванні від'ємного зворотного зв'язку через конденсатор CFB, струм процесів перезаряду якого формується між вхідним (V<sub>IN</sub>) та вихідним (V<sub>OUT</sub>)

колами. Коефіцієнт протифазного підсилення (компонент AMP) між цими колами становить

$$K_A = -\frac{V_{OUT}}{V_{IN}},$$

а коло зворотного зв'язку обумовлює ефект наведення у вхідне коло (ефект Міллера) еквівалентної ємності

$$C_{IN} = C_{FB}(1 + K_A).$$

Відтак, за умови

$$|C_{FB} \cdot K_A| \gg C_{QT} + C_{P1} + C_{P2}$$

вираз вихідної напруги

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot K_A = \frac{Q \cdot K_A}{C_{QT} + C_{P1} + C_{P2} - C_{FB} \cdot K_A}$$

спрощується до

$$V_{OUT} \approx \frac{Q}{C_{FB}}.$$

Отже, вихідна напруга зарядового підсилювача не залежить від паразитних ємностей вхідного кола, а визначається лише нормованого відносно ємності кола зворотного зв'язку значення наведеного в п'єзоелектричному перетворювачі заряду.

Схему заміщення функціональної SPICE моделі зарядового підсилювача (без врахування параметрів активного компоненту підсилення) представлено на рис. 5.19. З урахуванням реальних параметрів п'єзоелектричного перетворювача його еквівалентна схема Q Model представлена RC колом – Rq1, Rq2, Cq1, Cq2, яке активується джерелом VINP (рис. 5.20). Паразитне RC коло сигнальної лінії та вхідне коло підсилювача X1 представлено компонентами Cp, Rp, а коло зворотного зв'язку підсилювача - компонентами Cfb, Rfb.

Отримані модельним дослідженням епюри сигналів, зокрема для Cfb = 3E-10 F (#1), 1E-10 F (#2), 3E-11 F (#3), що підтверджують виведені викладки, представлено на рис. 5.21. Крім того, для виявлення впливу інших

дестабілізуючих факторів, зокрема вхідного опору підсилювача та якості (добротності, електричного імпедансу) ізоляції в лінії передачі сигналу проводили дослідження залежності вхідних та вихідних сигналів від опору Rp. Приклад таких досліджень демонструється на рис. 5.22, на якому показано, що зменшення цього опору (збільшенні паразитної омічної провідності вхідного кола) до значень Rp = 1E5 Ohm (#1), 3E5 Ohm (#2), 1E6 Ohm (#3) призводить до суттєвої нестабільності сигналів. Відтак, такий тип нестабільності необхідно враховувати під час розроблення вузла підсилювача заряду. Зокрема, є недопустимим використовувати схемні рішення елементарних інвертуючих підсилювачів на основі операційних підсилювачів з парою резисторів від'ємного зворотного зв'язку. Вхідний імпеданс такого інвертуючого підсилювача за принципом побудови кола зворотного зв'язку є надто низьким.



Рис. 5.19 Схема заміщення функціональної SPICE моделі зарядового підсилювача



Рис. 5.20 Специфікація моделі джерела VINP



Рис. 5.21 Епюри сигналів для Cfb = 3E-10 F (#1), 1E-10 F (#2), 3E-11 F (#3)



Рис. 5.22 Епюри сигналів для Rp = 1E5 Ohm (#1), 3E5 Ohm (#2), 1E6 Ohm (#3)

Приймаючи до уваги цю закономірність побудова зарядового підсилювача повинна передбачати використання двох каскадів (рис. 5.23), перший з яких є повторювачем напруги (XOA1), а другий - інвертуючим підсилювачем (XO2) з коефіцієнтом K<sub>V</sub> = -Ra2 / Ra1.



Рис. 5.23 Схема заміщення параметричної SPICE моделі двокаскадного зарядового підсилювача

Далі, з метою демонстрації прикладів параметричного аналізу схеми, тобто встановлення закономірностей похибок функціонування при девіації (нестабільності) параметрів операційних підсилювачів, розглянемо процес специфікації параметрів їх SPICE моделей (рис. 5.24 та рис. 5.25) та результати досліджень схеми інвертуючого підсилювача (для значень R1 = 1E3 Ohm, R2 = 1E5Ohm) при зміні його напруги зміщення V<sub>OFF</sub> = 2E-3 V (#1), 0 (#2), -2E-3 V (#3) (рис. 5.26) та при зміні смуги частот підсилення за параметром Gain Bandwidth - GBW = 1E7 (#1), 1E6 (#2), 1E5 (#3) (рис. 5.27). Результати таких досліджень використовуються під час вибору типу операційних підсилювачів та інших компонентів розроблюваної схеми сигнального тракту.



Рис. 5.24 Специфікація параметрів SPICE моделі операційного підсилювача



Рис. 5.25 Текстовий опис SPICE моделі операційного підсилювача



Рис. 5.26 Результати досліджень для V<sub>OFF</sub> = 2E-3 V (#1), 0 (#2), -2E-3 V (#3)



Рис. 5.27 Результати досліджень для GBW = 1E7 (#1), 1E6 (#2), 1E5 (#3)

Далі необхідно дослідити закономірності впливу ємності конденсатора від'ємного зворотного зв'язку на швидкість встановлення вихідної напруги підсилювача. Для цього використаємо метод порівняння, відповідно до якого проводимо параметричний аналіз двох типів схем — підсилення та інтегрування. У першому з них — підсилювачів (рис. 5.28) - параметри кола зворотного зв'язку визначаються переважно резистивними компонентами. Натомість, у другому типі (рис. 5.29), який використовується в схемах інтегрування сигналу (при R2 > 1Е7 Ohm) у вихідних каскадах аналогового тракту перед подальшим аналого-цифровим перетворенням, коло зворотного зв'язку визначається ємністю Cfb.



Рис. 5.28 Результати досліджень для R1 = 1E3 Ohm, R2 = 1E5 Ohm, Cfb = 0 (#1), 1E-11 F (#2), 1E-9 F (#3)



Рис. 5.29 Результати досліджень для R1 = 1E3 Ohm, R2 = 1E8 Ohm, Cfb = 3E-10 F (#1), 5E-10 F (#2), 1E-9 F (#3), 2E-9 F (#4), 3E-9 F (#5)

На рис. 5.30 представлено приклади параметричного аналізу двокаскадного зарядового підсилювача при Cfb = 3E-10 F (#1), 1E-10 F (#2), 3E-11 F (#3), на рис. 5.31 - фотографія плати відладки системи AMES, а на рис. 5.32 – приклади осцилограм сигналів під час експериментальних досліджень.



Рис. 5.30 Епюри сигналів двокаскадного зарядового підсилювача для Cfb = 3E-10 F (#1), 1E-10 F (#2), 3E-11 F (#3)



Рис. 5.31 Фотографія плати відладки системи AMES



Рис. 5.32 Приклади осцилографічних досліджень сигналів системи AMES

## 5.3. Методи дослідження акустики в інтегрованому середовищі REW

Розглянемо типові методи експериментальних та модельних досліджень на прикладі інтегрованого середовища - безкоштовного програмного забезпечення для вимірювання акустики приміщення та ayдioпристроїв – REW - Room EQ Wizard Room Acoustics Software (<u>https://www.roomeqwizard.com/</u>). REW містить інструменти (рис. 5.33) для:

- генерації звукових тестових сигналів;
- вимірювання потужності звукових хвиль SPL (Sound Pressure Level) та акустичного імпедансу;
- вимірювання частотної та імпульсної характеристик;
- вимірювання спотворень;
- створення графіків фази, групової затримки та спектрального розпаду, водоспадів, спектрограм і кривих енергія-час;
- генерування графіків аналізатора реального часу (RTA);
- розрахунок часу реверберації; обчислення параметрів Тіле-Смолла;
- визначення частот і часів загасання модальних резонансів;
- відображення відповідей еквалайзера та автоматичне налаштування параметричних еквалайзерів для протидії паразитним ефектам;
- моделювання адаптивної акустики відповідно до цільової задачі.



Рис. 5.33 Вікна конфігурування процесу вимірювання в REW

Приклад процесу модельних досліджень акустики приміщення для заданих параметрах кімнати та просторового розміщення джерел звуку наведено на рис. 5.34, а типові приклади результатів таких досліджень – на рис. 5.35. Передбачено можливості керування параметрами та режимами вимірювання, зокрема - Modal Resonance Line, Microphone Positions, Speaker Controls тощо. Результатами такого модельного дослідження є частотна характеристика (Frequency Responses) та модальні спотворення (Modal Distribution).



Рис. 5.34 Приклади модельних досліджень АЧХ акустики



Рис. 5.35 Результати модельних досліджень ФЧХ акустики

Приклади експериментального вимірювання методом осцилографії (Scope), зокрема з погляду на роздільну здатність вимірювання представлено на рис. 5.36. Передбачено двоканальне вимірювання (CH1, CH2) з можливістю вимірювання різницевого сигналу (CH1 - CH2) та типовим набором керування діапазонами вимірювання Voltage/Div та Time/Div. Як і в більшості осцилографічних засобів вимірювання, передбачено керування режимами синхронізації (Trigger). Приклад елементарних досліджень частотної характеристики SPL & Phase vs. Frequency наведено на рис. 5.37.



Рис. 5.36 Приклади осцилографічних методів досліджень акустики



Рис. 5.37 Приклад елементарних досліджень АЧХ

Фрагменти вікон вибору та конфігурування методів дослідження, зокрема методу Sweep, що передбачає сканування частоти звукових коливань в заданому частотному діапазоні, та калібрування сигнального тракту наведено

на рис. 5.38. Приклад використання методу Sweep та його результат наведено на рис. 5.39.



Рис. 5.38 Фрагменти вікон вибору та конфігурування методів дослідження



Рис. 5.39 Використання методу Sweep (зверху) та його результат (знизу)

Основні методи та вибіркові приклади характерних результатів експериментальних досліджень, що проводилися в рамках роботи, представлено на:

- рис. 5.40 АЧХ та ФЧХ з виявленням резонансних явищ;
- рис. 5.41 частотна характеристика акустичного імпедансу (Impedance);
- рис. 5.42 характеристика з візуалізацією спектрограми (Spectrogram);
- рис. 5.43 конфігурування фільтрів (EQ for measurement) ;
- рис. 5.44 АЧХ затухання звукових хвиль (Decay);
- рис. 5.45 тривалість реверберації (RT60, Reverberation Time);
- рис. 5.46 АЧХ реверберації (Waterfall);

- рис. 5.47 АЧХ спотворень (Distortion);
- рис. 5.48 АЧХ розбірності мови (Clarity).



Рис. 5.40 Дослідження АЧХ та ФЧХ з виявленням резонансних явищ



Рис. 5.41 Результат досліджень АЧХ імпедансу (Impedance)



Рис. 5.42 Результат досліджень з візуалізацією спектрограми (Spectrogram)



Рис. 5.43 Вікно конфігурування фільтрами (EQ for measurement)



Рис. 5.44 Результат дослідження АЧХ затухання звукових хвиль (Decay)



Рис. 5.45 Результат дослідження тривалості реверберації (RT60)



Рис. 5.46 Результат дослідження АЧХ реверберації (Waterfall)



Рис. 5.47 Результат дослідження АЧХ спотворень (Distortion)



Рис. 5.48 Результат дослідження АЧХ розбірності мови (Clarity)
## 5.4. Метод комплексної верифікації процесів дослідження акустичних параметрів

В рамках даної роботи проведено аналіз проблем, що виникають, як під час дослідження акустичних характеристик приміщень наявними на сьогодні засобами дослідження, так і під час розроблення нового покоління таких засобів з урахуванням вище розглянутих вимог розвитку інформаційних технологій та комп'ютерної техніки в галузі акустометрії.

Як вже зазначали, основним протиріччям є реалізація прецизійних та достовірних вимірювань під час переходу від доволі унікальних методів та засобів досліджень акустики до малогабаритних масових пристроїв сучасної комп'ютерної техніки, у тому числі — in-situ вимірювань за неможливості забезпечити необхідні рівні акустичного шуму. Першим викликом є вимірювання акустичних параметрів у приміщеннях з присутністю людей та працюючого обладнання відповідно до технологій адаптивної акустики, а другим — реалізація апаратури дослідження без необхідності використання габаритних та прецизійних компонентів, зокрема студійних мікрофонів.

Відтак, важливою складовою вирішення даного протиріччя є комплексна верифікація використовуваних засобів дослідження акустики. Розглянемо запропонований у цій роботі метод та послідовність такої верифікації з використанням вже згаданого професійного програмного забезпечення REW - Room EQ Wizard Room Acoustics Software, в якому надано можливість (після відповідних налаштувань та калібрувань – рис. 5.49 - рис. 5.52) візуалізувати етапи проведення запропонованого методу верифікації.

Preferences											
Soundcard	Cal files	Comm	s A	nalysis	Equaliser	View					
Graph											
🕑 Use thic	ck traces				🗹 Ena	ble mousew	heel zoom		Trace highlight options		•
🗹 Use ant	ialiasing for	traces			🗌 Lim	it mousewh	eel zoom ra	ate	Show watermark text on	graphs	
🗹 Use thio	cker traces fo	or average	25		Sav	e trace colou	ur with mea	isurement	Enter watermark text		
Show a	spect ratio d	B/decade							Default trace colours		
Freq axis sta	irt (Hz)		2.0	•							
Freq axis pro	eset 1 L		10	\$	Freq axi	s preset 2 L		20	\$ Preset 1 aspect ratio:	As plotted	•
Freq axis pro	eset 1 R		200	\$	Freq axi	s preset 2 R		20000	\$ Preset 2 aspect ratio:	As plotted	•
Interface											
					_				_		
🗹 Show to	oolbar text la	abels			🗹 Sho	w grid on th	numbnails		✓ *Scale fonts for display D	PI	
🗹 Show g	raph button	text labe	s		🗹 Sho	w toolbar			*Maximum measurements:	30	\$
Suppres	ss soundcard	errors			🗹 Sho	w [FDW] in	name if use	ed	*General font size:	12	\$
🗸 Full sca	le sine rms i	s 0 dBFS			🗹 Dor	n't show the	welcome n	nessage	*Graph font size:	12	\$
🗹 Keep SF	L Meter on	top			🗌 Sho	w measurer	ment notes	in tooltip	*Max RTA inputs (Pro):	16	\$
🗹 Keep Le	evel Meters o	on top			🗹 Sho	w phase wra	ap lines		*Max level meters inputs (Pro	o): 16	\$
🗹 Keep si	gnal generat	or on top			🗹 Sho	w minor gri	d lines		Settings marked * are applied	l after restai	rt
🗹 Keep fil	ters panel o	n top			🗹 Ani	mate measu	irements lis	t	Speed of sound (ft/s):	1125	\$
Show n	neasuremen	t level on	thumb	nails	🗌 Disa	able tooltips			Distance units:	feet	•
Confirm	n unsaved m	neasurem	ent rem	oval	🗌 Ора	que control	l panels		Colour scheme:	Light	•
🗹 Mousev	wheel adjust	s control	on hov	er	🗹 Sele	ect all traces	on Overlay	s open			

Рис. 5.49 Вікно налаштування візуалізації даних та попереджень

Second and	al files	Comme	Amphasia	Couplings	Minus							
Soundcard	di illes	comms	Analysis	Equaliser	view							
Default equal	ser				Target defaults							
Manufacturer	Gene	ric	-		Target type:	S	ubw	oofer 🔻		Target level:	75,0	4
Model:	Generic				Bass mgmt slope:	12 dB/oct ▼				BM cutoff:	80	4
	Apple	: D			LF slope:	24 dB/oct ▼ L-R2 ▼ L-R2 ▼				LF cutoff:	10	1
	Audio	o Design Asso otec Fischer	clates		Crossover HP type:					HP cutoff:	100	1
	Behri	nger			Crossover LP type:					LP cutoff:	1000	4
Beta		Three										
	Cami	llaDSP -			Room curve	Start (Hz)		End (Hz)		Slope (dB/Oc	t.)	
	d&b	n audiotechnik			LE rise:	200	\$	20	¢	1.0	\$	
	DSPe	aker			HE fall:					0.5	•	
	Dutch	n & Dutch				-			0,5	•		
	Emot	iva										
	Grace	Design			Filter calculation							
	Hype	x			🗹 Drop filters if gair	n is small						
	JL Au	dio										

Рис. 5.50 Вікно налаштування еквалайзера

Preferences									-
Soundcard	Cal files	Comms	Analysis	Equaliser	View				
Impulse re	sponse wind	ow defaults							
Left side			Rig	ht side		IR decay/waterfall	left	IR decay/waterfall right	
Tukey 0.25		•	Т	ıkey 0.25	•	Hann	-	Tukey 0.25	•
🗹 Set win	dow widths	automaticall	/			Waterfall (audio da	ata)	Spectrogram	
Default wid	lth (ms)	125 🌲	De	fault width (m	ns) 500 🌲	Gaussian	•	Gaussian	•
Add free	quency dep	endent wind	ow 15	cycles 🜲		FDW units:	cycles 🔻		
Impulse re	sponse calcu	lation				Frequency respor	nse calculation		
Truncate If	Rafter 1.7 s		• •	Decimate IR		Allow 96 PPO	log spacing	No smoothing	•
For import	s set t=0 at i	mpulse peak	• •	Adjust clock	with acoustic ref	Show respons	e below window limit		
IR oversam	pler: Windo	wed sinc	•	Adjust clock	with loopback	🗹 Use right wind	dow width for min vali	d frequency	
🗹 Loopba	ack delay refe	erence is IR p	eak 🗸	Align IR peak	k	🗹 Limit cal data	boost to 20 dB	Apply cal files to distortion	on
			V	Align t=0 to	a sampling instant				

Рис. 5.51 Вікно налаштування методів та параметрів аналізу даних



Рис. 5.52 Вікно калібрування звукової карти

З метою демонстрації артефактів (небажаних результатів) під час вимірювання акустики в досліджуваному приміщенні створювалися умови, що властиво приводять до виникнення цих артефактів. Важливо зазначити, що лише професійні апаратно-програмні комплекси можуть виявляти проблеми достовірності дослідження та виводити інформацію про суть цих проблем. Натомість, використання простіших засобів дослідження, в тому числі з використанням кастомізованих пристроїв загальних чи спеціалізованих досліджень, може призводити до значних похибок результатів вимірювань. Особливо ця проблематика характерна: по-перше, під час розроблення вже згаданих малогабаритних масових пристроїв акустометрії відповідно до наявних тенденцій розвитку комп'ютерної техніки масового застосування, і по-друге, під час дослідження акустики зашумлених приміщень.

Першим етапом методу верифікації рис. 5.53 (#1) є аналіз впливу акустичного шуму на результати вимірювань. На фрагменті (#2) рис. 5.53 показано приклад попередження про низький рівень співвідношення сигналшум (Poor measurement signal-to-noise), а на фрагменті (#3) рис. 5.53 - попередження про необхідність підвищення потужності сигналу з подальшим калібруванням сигнального тракту.

На другому етапі проводять аналіз нелінійних спотворень під час перетворення електричних сигналів в акустичні хвилі та зворотного

перетворення параметрів акустичних коливань в електричний аналоговий сигнал та цифровий код. Цей етап має значну актуальність саме під час переходу від прецизійної до масової апаратури акустичних досліджень. Відтак, вимірювання рівня спотворень сигналів є критично важливим. Приклад попередження про високий рівень спотворення (High measurement distortion) в сигнальному тракті представлено на фрагменті (#4) рис. 5.53, а про перевищення діапазону цифро-аналогового перетворення (ЦАП) - на фрагменті (#5) рис. 5.53.



Рис. 5.53 Попередження про проблеми процесу вимірювання

На третьому етапі верифікації проводять перевірку інформативності сигналів, зокрема кількості отриманої під час досліджень інформації. Для прикладу на фрагменті (#6) рис. 5.53 показано попередження про недостатню кількість даних для проведення достовірного FFT перетворення.

Безумовно якість (достовірність) вимірювання визначається не лише

кількісними параметрами даних, але і доволі широким набором інших факторів, мова про які вже була раніше. Розглянемо приклади аналізу цих факторів та виявлення характерних закономірностей отримуваних результатів.

Відтак, на четвертому етапі проводять дослідження ефективності методу розпізнавання акустичних шумів та електромагнітних завад. Для цього в досліджуваному приміщенні формують шум заданої спектральної густини, проводять його вимірювання та спектральних аналіз. Приклад таких досліджень з формуванням білого (White Noise) та рожевого (Pink Noise) чи флікер шумів представлено на рис. 5.54. Для білого шуму характерним є рівномірний розподіл спектральних складових по всьому діапазону частот, а для рожевого (флікер) – зменшення спектральної густини стохастичних процесів зі збільшенням частоти (зокрема за законом 1/f).



Рис. 5.54 Результат дослідження білого (зверху) та рожевого (знизу) шумів

Далі, проводять дослідження в умовах впливу підвищеного рівня електромагнітної завади силової мережі та її співставлення з інформативним сигналом, зокрема як це представлено на рис. 5.55. Актуальними є виявлення характерних закономірностей акустичного шуму та його співставленням з монотонною розмовою (single speaker) - рис. 5.56.



Рис. 5.55 Результат дослідження впливу електромагнітної завади 50 Гц (зверху) та її співставлення з гармонічним рядом сигналу(знизу)



*Рис. 5.56 Результат дослідження впливу акустичного шуму (зверху) та* монотонної розмови - single speaker (знизу)

На цьому етапі верифікації процесу дослідження акустичних параметрів приміщень доцільним є встановлення закономірностей формування низькочастотних складових завад зі звуженням діапазону, зокрема до 100 Гц. Приклад результатів таких досліджень з електромагнітною завадою 50 Гц та високим рівнем низькочастотних вібрацій представлено на рис. 5.57. Крім, властиво, виявлення низькочастотних вібрацій, дослідження з акцентом на низькочастотні складові є важливим під час вимірювання параметрів чвертьхвильових та пів-хвильових акустичних демферів та резонаторів.



Рис. 5.57 Результат дослідження в низькочастотному діапазоні до 100 Гц з електромагнітною завадою (зверху) та низькочастотних вібрацій (знизу)

На п'ятому етапі методу верифікації сигнального тракту проводять дослідження ефективності методики гармонічного аналізу. Ефективність цієї методики визначається, ЯК параметрами задаючого сигналу, i так достовірністю результатів FFT перетворення. Параметри задаючого сигналу, поза вже згаданих нелінійних спотворень, задаються амплітудною та частотною характеристиками джерел випромінювання тестових звукових коливань. Для прикладу на рис. 5.58 представлено синтез сигналів з гармонічними складовими від 2<sup>nd</sup> 9<sup>nd</sup> для двох значень ДО частоти

ЦАП - 32 kHz (зверху) та 8 kHz (знизу). Як і слід очікувати, можна бачити суттєву залежність форми задаючого від параметрів ЦАП. Далі визначають достовірність результатів FFT перетворення. Для цього, як показано на рис. 5.59, синтезують набір сигналів з гармонічними спотвореннями та проводять аналіз результатів FFT перетворення.



Рис. 5.58 Синтез сигналів для різних частот ЦАП



Рис. 5.59 Синтез набору сигналів з гармонічними спотвореннями

Під час верифікації достовірності результатів таких досліджень аналізують вплив формату вихідних даних, зокрема частоти виборок F<sub>S</sub> та роздільну здатність (розрядність) D<sub>R</sub> ЦАП-АЦП на точність FFT перетворення та співвідношення сигнал-шум SNR. Приклади результатів таких досліджень для основної частоти F<sub>0</sub> = 1 кГц та її першої гармоніки F<sub>IR</sub> = 2 кГц демонструються на рис. 5.60 (при F<sub>S</sub> = 48 кГц, D<sub>R</sub> = 32 біт), рис. 5.61 (при F<sub>S</sub> = 48 кГц, D<sub>R</sub> = 16 біт) та рис. 5.62 (при F<sub>S</sub> = 8 кГц, D<sub>R</sub> = 32 біт). Приклади результатів схожих досліджень для двох гармонік F<sub>IR</sub> = 2 кГц ла кГц наведено на рис. 5.63, а для певного набору F<sub>IR</sub> = 2 кГц ...9 кГц – на рис. 5.64.



Рис. 5.60 Результат FFT перетворення для  $F_S = 48 \kappa \Gamma q$ ,  $D_R = 32 \delta im$ 



Рис. 5.61 Результат FFT перетворення для  $F_S = 48 \kappa \Gamma \mu$ ,  $D_R = 16 \delta im$ 

		Show distortion	Reset averaging	WAV	La Current	Hal Be Peak Be	al →	Stepped sine	Calibrate level	FS sine Vrms 1,0000 V	I • \$ •
	1 000,00 H	z -5,30 dBFS 1	11,69 dB	1		1					112.66 dB
	Sp	an: 0 3 800 H	2							2	112,6 dB C, 112,9 dB A
	N+D: 106,9 dB A	THDH2,3:	50,1 %								Peak sample: -3,66 d0/5 112 7 /R 22 , 22/ IN/W
	N: -27,3 dB	THD+N:	44,8 %								
	SNR: 139.0 dB	ENOB:	2.1 bits								
	2nd: 50,1 %	3rd:	0,000005 %								
				_							
						-					
						-					
											3
		- 1				-		1			
					1 .					1 1 1 1 1	
			البيات ب		11111			անուն ներեր	1.0.0	n linda ki ku da ki a m	الأعاليك ليقربوا المتامية وتواتيهم والمراب الموجوع الرابي المرابي
	الروا التلخلة حرا الزز	the states of th	والأربان والمراز		1,010,0	r wuy	والمالية الأجانية واللاتة	The state of the second se			t d <b>har allada a tardha ka sa ka allada a a bu</b>
بالمرار اللال		• III • ) • • [1									
لذلدانه											
i de la com											
i de la com							1 .				
	an ta carliad	المعايلات		<b></b>							
	a Nort Kalindan		t ddd ddau	at dhe	t si di te s	المتحالية ال	la fuirt al a		A DA DE DA		
					l i l i i	d din H	<u> 1, 11 i i i i i i i i i i i i i i i i i</u>	. <b></b>	da A.U	. U Luki i Lu	ik altasida olda tarbat serak oldaria.
									dd Ad	n di nalitalan	di dadi mili kada a di suka da an
					lai Ulu			ded følse i	ikihi dhali	. Hi talih ilan	the all at the first of the start of the sta

Рис. 5.62 Результат FFT перетворення для  $F_S = 8 \kappa \Gamma \mu$ ,  $D_R = 32 \, \textit{бim}$ 



Рис. 5.63 Результат FFT перетворення для  $F_{IR} = 2 \kappa \Gamma \mu$ , 3  $\kappa \Gamma \mu$ 



Рис. 5.64 Результат FFT перетворення для  $F_{IR} = 2 \kappa \Gamma \mu \dots 9 \kappa \Gamma \mu$ 

На шостому етапі верифікації процесу дослідження акустичних параметрів визначають ефективність використання типових для акустометрії RTA (Real-Time Analyzer) фільтрів з кратними до октави смугами частот та їх співставлення з результатами FFT перетворення. Водночас доцільно виявити закономірності виникнення артефактів, зокрема хибного виявлення неіснуючих (за вихідними даними експериментів) вищих гармонік Приклади таких досліджень для  $F_{IR} = 2$  кГц, 3 кГц представлено на рис. 5.65 - рис. 5.70.



Рис. 5.65 Результат FFT перетворення для  $F_{IR} = 2 \kappa \Gamma \mu$ , 3  $\kappa \Gamma \mu$ 



Рис. 5.66 Результат RTA перетворення з фільтром 1/24 октави



Рис. 5.67 Результат RTA перетворення з фільтром 1/6 октави



Рис. 5.68 Результат RTA перетворення з фільтром 1/3 октави



Рис. 5.69 Результат RTA перетворення з фільтром 1/2 октави



Рис. 5.70 Результат RTA перетворення з фільтром 1/1 октави

Сьомий етап передбачає верифікацію коректності вимірювання пристроїв дослідження акустичних характеристик та їх калібрування. Особливо цей етап важливий під час розроблення кастомізованих пристроїв акустометрії у вже згаданій тенденції розвитку комп'ютерної техніки масового застосування. Верифікацію та калібрування здійснюють з використанням еталонних засобів акустометрії з високим класом точності вимірювання (класу 1) відповідно до стандартів PN-EN ISO / IEC 17025 International Standard for Testing and Calibration Laboratories (рис. 5.71), зокрема чотириканального аналізатора звуку та вібрації класу 1 SVAN 958A (рис. 5.72).



Рис. 5.71 Стандартизоване калібрування (SVANTEK Calibration Laboratory)



Рис. 5.72 Чотириканальний аналізатор звуку класу 1 SVAN 958А

Перевагою SVAN 958А є можливість виконувати розширений аналіз даних одночасно з режимом вимірювача рівня шуму. Кожен із чотирьох вхідних каналів може бути незалежно налаштований для виявлення звуку або вібрації різними фільтрами постійним 3 часом детектора та Цe середньоквадратичного значення. дає можливість отримувати широкосмугові результати, такі як Leq, RMS, LMax, LMin, LPeak разом з чотириканальним аналізом, таким як FFT чи аналіз 1/1 або 1/3 октавних смуг.

Для прикладу на рис. 5.73 представлено верифікацію коректності функціонування мобільного (Bluetooth) вимірювача шуму масового використання (ціною порядку 100 USD) SL5868 - Digital Sound Pressure Noise Level Meter. В якості еталонного пристрою використовували вже згаданий аналізатор звуку класу 1 SVAN 958A та спеціалізоване джерело акустичних хвиль власної розробки відповідно до запропонованого в цій роботі методу векторного імпульсно-частотного зондування. Необхідно врахувати, що для підвищення достовірності калібрування здійснюють з використанням сигналів різного частотного діапазону, зокрема гармонічних коливань, білого та рожевого (флікер) шумів тощо.

Приклад результатів експериментального дослідження сигналів вимірювача шуму SL5868 під час калібрування представлено на рис. 5.74. Можна бачити характерний розкид таких даних, що обумовлено обмеженою точністю функціонування даного пристрою.



Рис. 5.73 Чотириканальний аналізатор звуку класу 1 SVAN 958А



Рис. 5.74 Приклад результатів дослідження сигналів SL5868

Далі, отримані результати порівнюються з даними еталонних вимірювань з використанням SVAN 958А та розраховуються коефіцієнти корекції. Ілюстрація поєднання вимірювача шуму масового використання SL5868BT та розробленого в рамках даної роботи програмного забезпечення корекції результатів вимірювання наведена на рис. 5.75. Співставлення результатів експериментальних досліджень під час калібрування, а саме – еталонних вимірювань (SVAN 958A), даних вимірювання без корекції (SL5868BT) та даних після корекції (SL5868BT+MatLab) представлено на рис. 5.76.



*Рис. 5.75 Ілюстрація поєднання вимірювача шуму масового використання SL5868 та програмного забезпечення корекції результатів вимірювання* 



Рис. 5.76 Співставлення результатів вимірювання під час калібрування

На восьмому етапі верифікації проводять тестові дослідження впливу умов експериментів, зокрема зашумленості приміщення та нелінійних спотворень в сигнальному тракті, на результати вимірювання тривалості та АЧХ затухання звукових хвиль з використанням характерних параметрів часу раннього затухання EDT (Early Decay Time) та часів реверберації RT60, RT30, RT20. На основі цих параметрів визначають розбірність мовлення та індекси музичної розбірності (Musical Clarity) - C50 (інтервал часу - 50 мс), C80 (80 мс).

Основним критерієм коректності результатів таких досліджень є взаємне співпадіння частотних характеристик значень часу реверберації RT60, RT30 та RT20. Тестові дослідження проводять в приміщеннях чи спеціалізованих боксах з мінімальним часом реверберації відповідно до ISO 3382 (Methods for the measurement of reverberation time in ordinary rooms). Розглянемо низку результатів вимірювань, характерних проведення для різних умов експериментів, зокрема при значних рівнях шуму та нелінійних спотвореннях в частотній смузі 100..200 Гц (рис. 5.77), 2..3 кГц (рис. 5.78) та широкій смузі частот (рис. 5.79). Натомість інші результати вимірювань отримані за низьких рівнів шуму та незначних спотвореннях наведено на рис. 5.80 та рис. 5.81.



Рис. 5.77 Результат дослідження відповідно до ISO 3382 (case #1)



Рис. 5.78 Результат дослідження відповідно до ISO 3382 (case #2)







Рис. 5.80 Результат дослідження відповідно до ISO 3382 (case #4)



Рис. 5.81 Результат дослідження відповідно до ISO 3382 (case #5)

233

Далі розглянемо послідовність та вибіркові приклади характерних результатів експериментальних досліджень, які відображають хід верифікації запропонованого в цій роботі методу векторного імпусно-частотного зондування.

Спершу аналізуються параметри процесу вимірювання. Приклад результату двоканального осцилографічного вимірювання та роздільна здатність вимірювання, що визначається, як параметрами аналого-цифрового перетворювача (АЦП), зокрема – його розрядністю та кількістю виборок в секунду SPS (Sample per second), так і співвідношенням сигнал-шум SNR (Signal to Noise Ratio) вимірювального тракту, представлено на рис. 5.82.



Рис. 5.82 Приклад двоканального вимірювання та роздільна здатність АЦП

Далі проводять вибір параметрів задаючих сигналів. Їх формування в простих методах акустичних досліджень здійснювалося з використанням мультифункціонального генератора Generator, основними типами сигналів якого є Tone (одночастотний), Multitone (мультичастотний), Noise (шум) та Sweeps (з частотною розгорткою). Специфікація сигналів типу Tone передбачає можливість вибору форми хвилі – Sine, Square, Sawtooth, Tone burst, CEA-2010 та J-test. Приклад генерування та вимірювання звукової хвилі частотою  $F_0 = 1$  кГц при інтерференції частотою завади силової мережі 50 Гц наведено на рис. 5.83.



Рис. 5.83 Генерування та вимірювання звукової хвилі частотою F<sub>0</sub> = 1 кГц за інтерференції частотою завади силової мережі 50 Гц

Специфікація сигналів у вікнах конфігурування генератора звукових коливань, зокрема в режимах Sine wave, Sawtooth та Noise - Pink random, представлена на рис. 5.84. У режимі Sine wave передбачена можливість добавити у сигнал гармонічне спотворення – Add harmonic distortion, що має актуальність при дослідженні завадостійкості використовуваних методів перетворення сигналів. Важливою є також можливість вибрати тип шумових сигналів (Pink random, White random, Pink Periodic, White Periodic) та їх спектральні характеритстики (Octave, 1/3 Octave, Custom). Приклад генерування шуму типу Pink random (Рожевий шум) наведено на рис. 5.85.



Рис. 5.84 Вікна конфігурування генератора звукових коливань у режимах: Sine wave, Sawtooth ma Noise - Pink random



Рис. 5.85 Генерування шуму типу Pink random (Рожевий шум)

Специфікація параметрів звукових коливань в режимах Sweeps, CEA-2010 та Tone burst представлено на рис. 5.86. Режим Tone burst є основним для реалізації методу імпусно-частотного зондування. Задається частота гармонічного коливання (Frequency), кількість циклів коливання в імпульсах (Cycles), тривалість цих імпульсів (Duration) та період повторення (Burst Period). Передбачається можливість вибрати форму огинаючої активуючих імпульсів, що підбирається в ході оптимізації динамічних параметрів їх встановлення. Форма огинаючої задається параметром Windows: Rectangular, Tukey 0,75, Tukey 0,5, Tukey 0,25, Cosine, Blackman, Flat-top.



*Рис. 5.86 Вікна конфігурування генератора звукових коливань в режимах: Sweeps, CEA-2010 ma Tone burst* 

Характерні приклади результатів досліджень методу імпусно-частотного зондування представлено на:

- рис. 5.87 генерування та вимірювання звукової хвилі типу Sweeps з ефектом багаторазової реверберації;
- рис. 5.88 генерування та вимірювання звукової хвилі типу Tone burst ( $F_0 = 1E3$ , Cycles = 5, Window: Tukey 0,75) з реверберацією;
- рис. 5.89 генерування та вимірювання звукової хвилі типу Tone burst ( $F_0 = 2E3$ , Cycles = 20, Window: Tukey 0,75) з реверберацією.



Рис. 5.87 Генерування та вимірювання звукової хвилі типу Sweeps з ефектом базаторагової реверберації

### багаторазової реверберації



Рис. 5.88 Генерування та вимірювання звукової хвилі типу Tone burst  $(F_0 = 1E3, Cycles = 5, Window: Tukey 0,75)$  з реверберацією



*Рис.* 5.89 Генерування та вимірювання звукової хвилі типу Tone burst  $(F_0 = 2E3, Cycles = 20, Window: Tukey 0,75) з реверберацією$ 

Наведені приклади специфікації експериментальних досліджень та їх вибіркові результати підтверджують можливість реалізації методу імпусночастотного зондування з заданою просторовою роздільною здатністю. Під час цих експериментів показана ефективність використання зондуючих імпульсів з оптимізованою тривалістю (кількістю циклів Cycles) та формою огинаючої (тип Window) визначаються параметрами відбитих сигналів ЩО (реверберації) та тривалістю перехідних процесів (зокрема Window: Tukey 0,75). Для підтвердження цього висновку на рис. 5.90 демонструються два незадовільні результати, причиною яких неоптимальні тривалості та форми зондуючих імпульсів, що призводить до небажаного спотворення сигналів.



Рис. 5.90 Приклади спотворення форми імпульсів

Інший приклад незадовільних результатів, а саме низька частотна селективність, що обумовлена значною інтерференцією корисного сигналу з завадою, демонструється на рис. 5.91. Однак, тут мова йде не про оптимізацію тривалості та форми зондуючих імпульсів, а про необхідність використання завадостійких методів перетворення сигналів. Такі методи представлено в попередніх розділах роботи.



*Рис. 5.91* Генерування та вимірювання звукової хвилі типу Tone burst  $(F_0 = 1E3, Cycles = 10, Window: Rectangular) з значною інтерференцією$ 

### 5.5. Висновки до розділу 5

Розглянуто спеціалізовані засоби досліджень акустики. Відзначено, що відповідно до спеціальності, за якою виконувалась робота, її об'єктом дослідження є процеси, математичні та інформаційні моделі апаратнопрограмної реалізації систем акустометрії, що виконує функції керування процесами вимірювання, формування та перетворення сигналів відповідно до спеціалізованих методів та засобів дослідження – актюаторів та вимірювачів, зокрема широкосмугових мікрофонів акустичних хвиль.

Відповідно до основних підходів запропонованої математичної моделі та програмного забезпечення M-Signal розрахунку ефективності частотної селекції сигналів розроблено вбудовану систему дослідження акустичних параметрів AMES. Її базою є програмована система на кристалі PSoC, на основі якої здійснено структурно-алгоритмічну реалізацію формування та програмного керування процесами вимірювання, зокрема встановлення частоти, фази та гармоніки. Крім функціональних можливостей керування процесами вимірювання, перевагою вбудованої системи AMES є реалізація вхідного тракту змішаного перетворення сигналів на основі методу селективного підсилення заряду. Цей метод перетворення сигналів забезпечує високий рівень завадостійкості вимірювання інформативного сигналу у вигляді зміни електричного заряду п'єзоелектричними перетворювачами. Представлено послідовність синтезу SPICE моделі зарядового підсилювача та вибіркові результати дослідження параметрів, які підтверджують основні принципи його функціонування та виявляють закономірності формування інформативних сигналів при дії дестабілізуючих факторів.

Розглянуто типові методи досліджень на прикладі інтегрованого середовища вимірювання акустики приміщення та аудіопристроїв REW. Процес дослідження охоплює етапи: генерації звукових тестових сигналів; вимірювання потужності звукових хвиль SPL та акустичного імпедансу; вимірювання частотної та імпульсної характеристик; вимірювання спотворень; створення графіків фази, групової затримки та спектрального розпаду, водоспадів, спектрограм і кривих енергія-час; генерування графіків аналізатора реального часу (RTA); розрахунок часу реверберації; визначення частот і часів загасання модальних резонансів; відображення відповідей еквалайзера та автоматичне налаштування параметричних еквалайзерів для протидії паразитним ефектам; моделювання адаптивної акустики відповідно до цільової задачі.

Проведено аналіз проблем, які виникають під час дослідження акустичних характеристик приміщень з врахуванням вимог розвитку

інформаційних технологій та комп'ютерної техніки в галузі акустометрії. Показано, що основним протиріччям у цьому процесі є реалізація прецизійних та достовірних вимірювань під час переходу від унікальних методів та засобів досліджень акустики до малогабаритних масових пристроїв сучасної комп'ютерної техніки. Першим викликом є вимірювання акустичних параметрів у приміщеннях з присутністю людей та працюючого обладнання відповідно до технологій адаптивної акустики, а другим – реалізація апаратури дослідження без необхідності використання габаритних та прецизійних компонентів, зокрема студійних мікрофонів.

Відтак акцентується, що важливою складовою вирішення ЦЬОГО протиріччя є комплексна верифікація засобів дослідження акустики. Запропоновано метод та послідовність такої верифікації, що охоплює етапи: аналізу впливу акустичного шуму на результати вимірювань; аналізу нелінійних спотворень під час перетворення електричних сигналів в акустичні хвилі та зворотного перетворення параметрів акустичних коливань в електричний аналоговий сигнал та цифровий код; перевірки інформативності сигналів, зокрема достатності отриманої під час досліджень інформації для проведення достовірного FFT перетворення; дослідження ефективності розпізнавання акустичних шумів та електромагнітних завад; методу дослідження ефективності методики гармонічного аналізу та типових для акустометрії RTA (Real-Time Analyzer) фільтрів з кратними до октави смугами частот та їх співставлення з результатами FFT перетворення; аналіз коректності процесу вимірювання та калібрування пристроїв дослідження акустичних характеристик.

#### РОЗДІЛ 6

### МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

Цей розділ містить детальний опис інверсного методу визначення опору потокові повітря пористих матеріалів за моделлю Мікі [17, 40], а також удосконалення методу визначення опору потокові повітря шляхом лінійної апроксимації у відповідному діапазоні експериментальних даних. Крім того, розглянуто метод добору коефіцієнтів звукопоглинання на основі формули Сабіна [18, 20, 22, 23, 47] та метод добору акустичних матеріалів за допомогою інверсних розрахунків товщини й опору потокові [22, 47]. Показано приклади реалізації програмного забезпечення для оброблення вимірювань з імпедансної труби та лабораторної установки [17, 40].

### 6.1. Аналіз методів визначення коефіцієнта звукопоглинання та постановка задачі

Розділ присвячено подальшому розвитку методів акустометрії, спрямованих на визначення та оптимізацію акустичних характеристик пористих матеріалів. Розглянуто нові підходи до вимірювання та моделювання опору потоку повітря в пористих матеріалах, що є одним із ключових параметрів під час визначення їх звукопоглинальних властивостей. Зокрема, акцент зроблено на розробленні нових методів, модифікації лабораторного обладнання, удосконаленні алгоритмів аналізу даних та синтезі акустичних матеріалів для досягнення заданих характеристик.

Одним із ключових завдань під час розроблення та оптимізації акустичних матеріалів є точне визначення їхніх звукопоглинальних властивостей, що суттєво залежить від параметра опору потоку повітря. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити низку проблем, зокрема підвищити точність і повторюваність вимірювань, удосконалити методи аналізу отриманих даних, а також створити підходи до адаптації параметрів матеріалів для забезпечення необхідних характеристик у заданому частотному діапазоні.

Важливим аспектом є також розроблення універсальних методів, які дають змогу враховувати особливості монтажу тонких і багатошарових матеріалів, а також оцінювати вплив густини та структури матеріалу на акустичні властивості. Вирішення цих завдань спрямоване на створення методів, які б значно прискорили процес вибору матеріалів для конкретних інженерних і дизайнерських рішень.

Під час проектування приміщень з певними акустичними параметрами або створення акустичних екранів важливо вибирати матеріали з певними коефіцієнтами звукопоглинання. Одним із способів визначення коефіцієнта звукопоглинання є перевірка його в ревербераційній камері, але цей процес дорогий і потребує значної кількості матеріалу для дослідження. Альтернативним методом є вимірювання в імпедансній трубці, але для цього потрібне спеціальне обладнання. У таких випадках найзручнішим та економічним підходом є використання розрахункового методу визначення коефіцієнта звукопоглинання за питомим опором повітряного потоку.

Питомий опір повітряному потоку є найважливішим параметром, що описує пористі матеріали, які використовують для моделювання коефіцієнта звукопоглинання. Цей коефіцієнт описує, яка частина акустичної енергії розсіюється в матеріалі.

Вибір матеріалів із визначеними характеристиками питомого опору повітряному потоку дає змогу максимально поглинати акустичну енергію з мінімальним використанням матеріалів. Такі системи та матеріали широко використовуються для акустичної обробки робочих приміщень (офіси, промислові підприємства, школи), а також для захисту від шуму (акустичні екрани), де їх метою є контроль і зменшення надлишку акустичної енергії.

Пористі середовища використовують у різноманітних практичних застосуваннях як звукопоглинальні матеріали та для контролю шуму [259-262]. Пористі структури мають виняткові властивості звукопоглинання в діапазоні середніх і високих частот [263-264]. Вони мають сітчасту структуру зі з'єднаними порами [265]. Процеси всередині пор, пов'язані з в'язкістю рідини, виробляють тепло від звукової енергії [266, 267]. Пористі структури можуть мати органічні, неорганічні та змішані композитні матеріали, такі як каміння, дерево, губки, піни, гума, неткані матеріали та текстильні вироби [268-270].

Основний параметр, який описує звукопоглинальні властивості матеріалу, це його коефіцієнт звукопоглинання, який задають як частину невідбитої падаючої енергії [261]:

$$a = 1 - \frac{E_r}{E_{tot}},\tag{6.1}$$

де *E*<sub>*r*</sub> - акустична енергія відбитої хвилі, Е tot – акустична енергія падаючої хвилі.

Коефіцієнт звукопоглинання можна визначити шляхом вимірювання в імпедансній трубці за допомогою методу стоячої хвилі [271] або методу з використанням коефіцієнта передавальної функції [272]. Вимірювання в імпедансній трубці характеризується дуже хорошою точністю та економічною ефективністю. Коефіцієнт звукопоглинання також можна визначити в ревербераційній камері [273, 274]. Можна вимірювати як плоскі, так і просторові елементи, включаючи крісла для аудиторій [275-276]. Тим не менш, ця техніка передбачає використання спеціальних ревербераційних камер. Як альтернативу вимірюванням, коефіцієнт звукопоглинання можна визначити за допомогою емпіричних моделей. Ці моделі засновані на великій кількості вимірювань різних матеріалів або інтерпретації фізичних процесів у цих матеріалах. Делані-Базлі [277] і Мікі [278] запропонували найпростіші емпіричні моделі, які вимагають лише одного параметра питомого опору повітряному потоку. Джонсон [268] і Шампу та Аллард [279] запропонували точнішу фізичну модель (модель JCA) з п'ятьма вхідними параметрами. На жаль, ці параметри зазвичай важко точно розрахувати. Бонфіліо та Помполі [280] представили зворотний метод для визначення фізичних параметрів

пористих матеріалів для моделі JCA. Також Вілсон [281] і Форлендер [274] обговорили труднощі у визначенні параметрів пористих середовищ через складність і мінливість матеріалів, включаючи такі фактори, як геометрична конфігурація, пористість і звивистість для моделі JCA. Це означає, що складніша модель може дати більшу похибку, яку важко оцінити.

Питомий опір повітряному потоку є одним з основних параметрів, що характеризує пористі матеріали. Його використовують як вхідний параметр для моделей, що дають змогу розрахувати коефіцієнт звукопоглинання однота багатошарових матеріалів, використовуючи Матричну передавальну функцію [282-285]. Камісінський [286] показав, що цей параметр можна використовувати також для розрахунку коефіцієнта звукопоглинання матеріалів з покриттям. Вимірювання опору потоку проводять відповідно до двох стандартів ASTM C522-03 [287], та ISO 9053-1, 2018 [288]. Основні відмінності між цими стандартами стосуються умов вимірювання. Хоча ASTM С522-03 дає змогу вимірювання потоку повітря відносно дослідного зразка в інших напрямках крім перпендикулярного, експеримент потрібно проводити зі сталим потоком повітря. З іншого боку, ISO 9053-1 дає змогу проводити вимірювання за змінної швидкості потоку повітря, але виключно для перпендикулярного потоку через дослідний пористий матеріал [288].

Обидва стандарти вимагають проведення вимірювань в умовах ламінарного потоку, гарантуючи незмінність опору потоку повітря під час зміни швидкості потоку. Стандарт ISO передбачає, що опір повітряному потоку потрібно визначати для швидкості потоку 0,5\*10-3 м/с або екстрапольовано для вищих значень, якщо пряме вимірювання неможливе за таких низьких швидкостей. У той же час ASTM вимагає, щоб вимірювання були при трьох різних швидкостях ламінарного потоку, кожна з яких відрізняється щонайменше на 25%.

Подібним чином Sebaa та ін. [289] запропонували метод визначення питомого опору потоку пористих матеріалів шляхом відбиття плоскої хвилі від пористого матеріалу. Описаний метод передбачає підгонку виміряного імпульсу, відбитого від досліджуваного матеріалу, до імпульсу, розрахованого часової області. Аналіз за допомогою моделі чутиловості моделі запропонованої Johnson [290] показав, що коефіцієнт відбиття звуку найчутливіший до питомого опору потоку, тоді як вплив пористості має мінімальний вплив. Крім того, Jeong [290] представив паралельну техніку для оцінки опору повітряному потоку. Однак їхній метод базувався на підборі вимірювань коефіцієнта звукопоглинання, отриманих у ревербераційній камері. На сьогодні техніку машинного навчання широко використовують в інверсному методі для характеристики пористих акустичних матеріалів [291,292].

# 6.2. Удосконалення лабораторної установки вимірювання опору повітряному потоку пористих матеріалів

Для вимірювання опору потокові повітря використовували лабораторний стенд, який до модифікації був оснащений цифровим дисплеєм, з якого зчитували значення вимірюваних параметрів такі як, тиск і потік повітря. Для отримання точних результатів необхідно проводити багато дослідів, і як наслідок це птребує багато часу. Важливим обмеженням також був різницевий манометр Dwyer 475-000-FM, точність якого становила 0,5% повної шкали (від 0 до 250 Па), а більшість вимірювань проводяться за тиску, що не перевищує 30 Па.

Через всі названі причини запропоновано модернізацію лабораторного стенду. Основною модифікацією була комп'ютеризація збирання даних та їх обчислень. Точність вимірюваннь підвищено завдяки використанню давача меншого діапазону. Запропоновано використати давач тиску Sontay PA-60-2-НА, який має точність  $\pm 1\%$  усієї шкали, що дорівнює  $50 \cdot 0,01 = \pm 0,5[\Pi a]$ . Для автоматичної реєстрації потоку повітря використовували витратомір Honeywell 5104VN, максимальна похибка якого становить  $\pm 3\%$ , а гістерезис  $\pm 0,5\%$ . Запропоновану схему модернізації стенду для вимірювання опору повітряного потоку показано на рис. 6.1, а його фото відповідно на рис. 6.2. Модернізація стенду дала змогу досягти більшої точності за допомогою використання точніших давачів.



Рис. 6.1 Схема вимірювального стенду



Рис. 6.2 Фото лабораторного стенду для вимірювання опору потокові повітря пористих матеріалів

На початковому етапі розроблено блок-схему, що ілюструє алгоритм роботи системи вимірювання опору повітряному потоку, як показано на рис. 6.3, разом із відповідною програмою. Програма складається з трьох основних модулів. Перший модуль ініціалізує давачі, другий виконує цикл збору даних, а третій відповідає за вивід результатів.



Рис. 6.3 Блок-схема алгоритму роботи програми керування вимірювальною

установкою

Фрагмент графічної програми на мові «G» для LabView (рис. 6.4) забезпечує опрацювання даних із давачів. Щоб зменшити ризик пошкодження давача тиску, передбачено перевірку максимального тиску, якщо він перевищує 45 Па, програма відображає попередження. Після будь-якої зміни повітряного потоку необхідний час для стабілізації тиску. Для автоматизації цього процесу в систему інтегровано таймер. Після завершення кожного циклу вимірювання для заданого потоку процес зупиняється та виводить повідомлення "Змінити потік". Після того як користувач змінить повітряний потік і натисне "ОК", програма зачекає визначену кількість часу перед початком наступних вимірювань.



Рис. 6.4 Фрагмент графічної програми LabView для опрацювання даних вимірювань

Для збору та опрацювання даних із лабораторної установки використано вимірювальну карту National Instruments PXI-446. У середовищі LabView розроблено спеціальну програму керування. Інтерфейс програми показано на рис. 6.5. У розробленій програмі передбачено параметри, які необхідно задати до початку вимірювань: товщину та площу дослідного зразка, затримка часу до наступного вимірювання (використовується для стабілізації потоку повітря після його зміни), кількість ітерацій (кількість вимірювань, які підлягають усередненню) і тривалість вимірювання. Встановивши крок вимірювань 100 мілісекунд, за одну хвилину можна отримати тисячі значень, що було неможливим до модифікації вимірювальної установки.

Після запуску на виконання процедура вимірювання повторюється *n* разів, де *n* - кількість ітерацій. Потім з'являється діалогове вікно, і користувачеві пропонується змінити значення повітряного потоку. Після обраного часу затримки вимірювання повторюється. Уся ця процедура повторюється, поки користувач не припинить її. Одночасно з вимірюванням відображаються діаграми тиску та потоку повітря, щоб забезпечити контроль над умовами вимірювання та уникнути порушень.



Рис. 6.5 Інтерфейс програмного забезпечення в LabView

Друга частина програми - це аналіз даних у режимі реального часу. Як показано на рис. 6.6, співвідношення між перепадом тиску і потоком повітря використовується для обчислення опору потоку повітря. Потім результати представляються на графіку. Ця функціональність програми дає змогу у реальному часі оцінити достовірність вимірювань та вирішити, коли вимірювання потрібно завершити. Після завершення вимірювання результати можна експортувати в обраний формат.



Рис. 6.6 Модуль результатів у LabView

Автоматичне керування за допомогою комп'ютерної програми дало змогу виконувати більше вимірювань для одного зразка, і, отримати більше результатів, усереднення яких дало змогу отримати кращу точність.

Для перевірки запроваджених модифікацій, результати, які отримані на модернізованому лабораторному стенді будуть у наступних підрозділах порівнюватися із результатами вимірювань в імпедансній трубі.

## 6.3. Удосконалення та верифікація методу продування потоком повітря пористих матеріалів

Метод, який використовують для визначення опору повітряного потоку пористих матеріалів - це метод визначення опору продуванню постійним потоком повітря [**288**, **293**]. Він полягає у контрольованому однонаправленому

проходженні повітря через тестовий зразок і вимірюванні різниці тиску перед зразком, після зразка і одночасному вимірюванні витрат повітря. У зв'язку із чим запропоновано використання різницевого давача тиску, таким чином ми одним давачем вимірюємо тиск перед дослідним зразком, та після нього.

Процедура визначення опору повітряного потоку пористого матеріалу:

•запис каталогових даних зразка, а саме: марка, компанія, густина, вага, товщина (якщо не вказано, необхідно виміряти товщину зразка);

•вимірювання барометричного тиску, присутнього у вимірювальній трубці над тестовим зразком (використовується для обчислення точної швидкості звуку в повітрі),

•вимірювання температури у вимірювальній трубці над тестовим зразком (використовується для обчислення точної швидкості звуку в повітрі),

•підключення повітряного контейнера до регулятора потоку повітря та встановлення мінімального потоку,

•реєстрація потоку повітря та різниці тиску. Для точніших результатів рекомендується змінювати потік повітря як вгору, так і вниз.

Модифікований метод визначення опору повітряному потоку пористих матеріалів базується на методі визначення опору продуванню постійним потоком повітря. Ідея стандартизованого методу визначення повітряного потоку полягає в тому, що повітря рухається контрольованим чином через досліджуваний зразок, і одночасно із цим вимірюється тиск до та після зразка. Маючи дані про зміну тиску  $\Delta p$  та об'ємну витрату повітря  $q_v$ , можна розрахувати опір потоку повітря:

$$R = \frac{\Delta p}{q_{\nu}}.$$
 (6.1)

Потім визначається питомий опір повітряному потоку, параметр, не залежний від площі зразка:

$$R_S = R * A = \frac{\Delta p}{Au}, A = \frac{\Delta p}{u}, \tag{6.2}$$

де: и - швидкість потоку повітря, А - площа зразка.
На наступному кроці визначають параметр, незалежний від товщини зразка – опір повітряному потоку: *r<sub>s</sub>* 

$$r_s = \frac{R_s}{D},\tag{6.3}$$

де *D* – товщина матеріалу.

Вимірювання рекомендовано проводити зі швидкістю повітряного потоку від 0,5 мм/с до 4 мм/с. Пропонується поступово зменшувати потік повітря до найнижчого можливого. Якщо використовується такий підхід, необхідно визначити співвідношення між опором повітряного потоку та швидкістю повітряного потоку. Питомий опір потоку Rs(u) можна визначити використовуючи лінійну регресію, а значення питомого опору потоку повітря Rs приймається для значення швидкості потоку повітря 0,5 мм/с.

Під час аналізу виявлено, що за низьких швидкостей повітряного потоку існує сильна нелінійність між питомим опором повітряного потоку (Rs) і швидкістю повітряного потоку (u). Лінійна регресія може призвести до значних помилок, якщо її використовувати для екстраполяції за низьких швидкостей повітряного потоку. Щоб уникнути цієї проблеми, запропоновано модифікацію методу статичного повітряного потоку, яка включає ітераційний метод PLA. Цей метод передбачає визначення полінома, який описує залежність між швидкістю повітряного потоку та перепадом тиску ( $q(\Delta p)$ ), а потім перетворення полінома в лінійне наближення опору повітряного потоку як функції швидкості повітряного потоку. Процес починається з найвищої швидкості повітряного потоку, і в кожній ітерації діапазон розширюється до швидкості повітряного потоку. У кожній ітерації нижчих значень обчислюється похибка між результатами вимірювання та лінійною регресією. Ітерації тривають до того часу, поки помилка не перевищить допустиме значення. На останньому кроці використовуючи поліном, знайдений на попередньому кроці, визначаємо опір повітряному потоку для швидкості повітряного потоку и=0,5 мм/с.

На рис. 6.7 показано співвідношення між об'ємним потоком повітря (сині точки) qv і спадом тиску Др для 5000 замірів. Як бачимо із графіка на рис. 6.7,

ця залежність є лінійною, однак якщо представимо це як залежність питомого опору потокові повітря від швидкості потоку повітря (рис. 6.8), то для низьких значень повітряного потоку розбіжність буде набагато більшою, а невизначеність вимірювання зростає. Для підвищення точності запропоновано розробити метод попередньої лінійної апроксимації (PLA).



Рис. 6.7 Залежність між об'ємним потоком qv і спадом тиску dp



Рис. 6.8 Залежність питомого опору потокові повітря Rs від швидкості потоку повітря и

Розроблений метод складається з чотирьох кроків:

 На наборі даних залежності питомого опору потокові повітря від швидкості потоку повітря R<sub>s</sub>(u) знайти мінімальне значення швидкості потоку повітря u<sub>min</sub>, за якого розкид результатів не перевищуватиме заданого порогового значення *E*:

$$u_{\min} = m in \{ u : R_s(u) \le \varepsilon \}, \qquad (6.4)$$

255

- Визначити, якій швидкості потоку повітря і різниці тиску ∆*р* відповідає мінімальне значення швидкості потоку повітря *u*<sub>min</sub>.
- Знайти апроксимуючу функцію методом лінійної апроксимації залежності швидкості потоку повітря *qv* від різниці тиску ∆*p* для діапазону, що відповідає значенням швидкості потоку повітря від максимального до *u<sub>min</sub>*.
- Використовуючи знайдену апроксимуючу фукнцію та застосувавши екстраполяцію, визначити значення опору потокові повітря для швидкості потоку 0,5 мм/с.

Для забезпечення більшої точності формули для обчислення лінійного потоку та опору потоку перераховані з урахуванням одиниць вимірювання давачів тиску та потоку. Також введено діаметр вимірювальної установки, який дорівнює 100 мм і є таким самим, як діаметр великої імпедансної труби. Це дає можливість порівняти результати, отримані для тих самих зразків двома методами. Виведені формули представлено нижче.

Для визначення лінійного повітряного потоку (Linear airflow):

$$\mathbf{u}\left[\frac{M}{c}\right] = \frac{qv\left[\frac{M^{3}}{c}\right]}{A[M^{2}]} = \frac{qv\left[\frac{M^{3}}{c}\right]}{\frac{\pi}{4}(d_{ycm}[M])^{2}} = \frac{6\cdot10^{4}qv\left[\frac{\pi}{x_{6.}}\right]}{\frac{\pi}{4}(0,01[M])^{2}} = \frac{qv\left[\frac{\pi}{x_{6.}}\right]}{150\cdot\pi}$$
(6.5)

де -  $d_{ycm.}$  - діаметр отвору для розміщення пористого матеріалу, що досліджуєтсья.

Для визначення питомого опору повітряному потоку (Specific airflow resistance):

$$R_{S}\left[\frac{\Pi a \cdot c}{M}\right] = \frac{R\left[\frac{\Pi a \cdot c}{M^{3}}\right]}{u\left[\frac{M}{c}\right]} = \frac{\Delta p}{qv \cdot u} = \frac{150\pi \cdot \Delta p[\Pi a]}{qv\left[\frac{\pi}{x_{B}}\right]}$$
(6.6)

Опір повітряному потоку (Airflow resistivity) визначаємо із виразу:

$$r_{S}\left[\frac{\Pi a \cdot x \cdot m}{\pi}\right] = \frac{R_{S}\left[\frac{\Pi a \cdot x \cdot m}{\pi}\right]}{D[m]} = \frac{150\pi \cdot \Delta p[\Pi a]}{qv\left[\frac{\pi}{x \cdot m}\right]} \cdot D[m]_{(1)}$$

де *D* – товщина дослідного зразка [м].

### Перевірка запропонованого методу

На рис. 6.9 показано графік опору потоку поліефірного матеріалу (Sinterm-FR) як функцію спаду тиску  $\Delta_p$ . Ці значення отримані трьома способами: обчислені в результаті експерименту, обчислені з використанням лінійного наближення для всього набору даних і обчислені за допомогою запропонованого методу PLA.



Рис. 6.9 Залежність питомого опору потоку повітря Rs від швидкості потоку повітря для Sinterm-FR

Для перевірки результатів використано модель Мікі для обчислення коефіцієнта звукопоглинання. Отримані коефіцієнти звукпоглинання для дослідного зразка порівняли із значеннями, отриманими шляхом вимірювання в імпедансній трубці.

Як можна зауважити на рис. 6.10, запропонований метод PLA та лінійної регресії за результатами експериментів дуже схожі у всьому діапазоні. Це відбувається тому, що розбіжності значень опору повітря симетричні щодо лінії регресії при низьких значеннях опору потоку повітря. Однак помилки у цьому діапазоні здебільшого є випадковими, а для іншого набору даних

результат не буде симетричним. У результаті запропонований спосіб буде ще точнішим.

Можна зауважити, що максимальна абсолютна похибка запропонованого методу дорівнює 0,008, що означає, що точність вимірювання на модифікованому стенді із використанням запропонованого методу є доброю порівняно з результатами, отриманими в імпедансній трубі.



Рис. 6.10 Порівняння значень коефіцієнта звукопоглинання для Sinterm-FR, отриманого шляхом вимірювання в імпедансній трубці та з використанням

запропонованого методу PLA

На рис. 6.11 показано залежність між потоком повітря *qv* і спадом тиску Др для меламінової піни.



Рис. 6.11 Залежність між об'ємним потоком qv і спадом тиску Др для

меламінової піни.

На рис. 6.12 показано приклад роботи методу для меламінової мочалки. Як бачимо для меламінової мочалки, пропонований спосіб дає змогу краще співставити регресійну пряму з експериментальними даними, що, водночас, дає змогу мінімізувати похибку вимірювання порівняно з раніше використовуваним методом.



Рис. 6.12 Залежність питомого опору повітряному потоку Rs від швидкості потоку для меламінової мочалки

На рис. 6.13 показано порівняння значень коефіцієнта звукопоглинання для меламінової піни, отриманих шляхом вимірювання та розрахунків. Порівняння показує, що метод PLA дає змогу точніше визначити коефіцієнт поглинання звуку порівняно з класичним методом.



Рис. 6.13 Порівняння значень коефіцієнта звукопоглинання для меламінової піни, отриманого шляхом вимірювання в імпедансній трубці та з використанням методу PLA

У таблиці 6.1 підсумовуються значення опору потокові повітря; стовпець "PLA" містить результати, отримані з використанням запропонованого методу, стовпець "Mes." містить усереднені результати експерименту та стовпець "Імпендансна тр."- опір потокові, обчислений з використанням значень коефіцієнтів звукопоглинання, отриманих вимірюванням в імпедансній трубі.

Таблиця 6.1

Матеріал	D	Густина	PLA	Експеримент	Імпедансна тр.		
	[MM]	[кг/м <sup>3</sup> ]	$R_s[\Pi \mathbf{a} \cdot \mathbf{c} / \mathbf{M}]$				
Sinterm-FR	30	45	3081	3138	3178		
Меламінова губка	30	9	11384	13318	10513		

Значення попору потоку повітря отримані різними методами

# 6.4. Інверсний метод визначення питомого опору повітряного потоку пористих матеріалів

Використовуючи імпедансну трубу або ревербераційну камеру ми можемо визначити коефіцієнти поглинання досліджуваного матеріалу в залежності від частоти звуку. Для того, щоб порівняти отримані результати треба аналізувати набори даних для всього частотного діапазону, однак якщо провести зворотне переведення коефіцієнтів поглинання у опір продуванню потоку повітря то можна порівнювати однолічбові значення. Саме тому поставлена задача розробити метод, який дасть змогу на основі коефіцієнтів звукопоглинання визначати опір потокові повітря, що дасть змогу легко порівнювати результати отримані трьома методами.

Розроблено метод, який передбачає підбір коефіцієнта звукопоглинання, розрахованого за моделлю пористого матеріалу Мікі, з результатами, отриманими в імпедансній трубці. Для розв'язку оберненої задачі необхідно знайти мінімальне середньоквадратичне відхилення  $U(\sigma)$ , яке визначається наступним чином:

$$U(\sigma) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\alpha_{t,i} - a_{m,i})^2}{N}}$$
(6.7)

де  $\alpha_{t,i}$  – коефіцієнт звукопоглинання для *i* -ї смуги частот, розрахований за моделлю Мікі для заданого питомого опору повітряного потоку  $r_s$ ;  $\alpha_{m,i}$  – коефіцієнт звукопоглинання для *i* -ї смуги частот визначений для того самого матеріалу в імпедансній трубці; N – кількість смуг частот.

Відповідно до моделі Мікі, на основі питомого опору повітряного потоку ми визначаємо характеристичний опір  $z_c$  і хвильове число  $k_c$  для заданого матеріалу:

$$z_{c} = \rho_{0}c_{0} \left[ 1 + 0.07 \left( \frac{f}{r_{s}} \right)^{-0.632} - j0.107 \left( \frac{f}{r_{s}} \right)^{-0.632} \right]$$
(6.8)

$$k_{c} = \frac{\omega}{c_{0}} \left[ 1 + 0,109 \left( \frac{f}{r_{s}} \right)^{-0,618} - j0,16 \left( 10^{3} \frac{f}{r_{s}} \right)^{-0,618} \right]$$
(6.9)

де  $\omega = 2\pi f$ , f – центральна смуга частот,  $\rho_0$  – густина повітря,  $c_0$  – швидкість звуку в повітрі, а  $r_s$  – опір повітряному потоку.

Поверхневий імпеданс визначається з наступної залежності:

$$z_w = -i \cdot z_c \cdot \cot(k_c \cdot D) \tag{6.10}$$

де *D* – товщина матеріалу.

Коефіцієнт відбиття звуку *R* розраховуємо із наступної залежності:

$$R = \frac{\frac{Z_{W}}{\rho_{0}c_{0}}cos(\theta) - 1}{\frac{Z_{W}}{\rho_{0}c_{0}}cos(\theta) + 1}$$
(6.11)

де *θ* = 0 – кут падіння звуку. Для розрахунку коефіцієнта звукопоглинання використовується наступна формула:

$$\alpha_{t,i} = 1 - \left| R^2 \right| \tag{6.12}$$

Опір потоку повітря може приймати значення від 0 до безмежності. Перевірка всіх можливостей теоретичної моделі (у цьому випадку моделі Мікі) вимагала б великих обчислювальних потужностей. Тому запропоновано метод швидкого добору значень опору потокові повітря. Попередні дослідження із використанням методу бісекції [50] показали, що при поділу інтервалу навпіл ми можемо не виявити найкращий результат. Отже, запропонований подібний підхід, де для знаходження мінімуму функції U(σ) взято за основу метод загального пошуку, який передбачає звуження інтервалу невизначеності функції діленням відрізка на декілька рівних частин з наступним обчисленням значень цільової функції в вузлах отриманої сітки. Завдяки поділу інтервалу не на два, а щонайменше на п'ять – значно зменшується час обчислень [293].

Запропонований інверсний метод визначення опору потоку повітря по коефіцієнтах звукопоглинання включає наступні кроки:

1. Ділимо діапазон пошуку опору потоку повітря мінімум на 5 відрізків;

2. Для всіх частот, які нас цікавлять та для кожного значення питомого опору повітряного потоку визначеного у попередньому кроці визначаємо за моделлю Мікі коефіцієнти звукопоглинання.

3. Визначаємо для кожного діапазону суму середньоквадратичних похибок RMSD або R<sup>2</sup> (дослідження показали, що два параметри дають той самий результат).

4. Визначаємо опір потоку повітря, який має найменше значення суми середньоквадратичних похибок та розширюємо діапазон у меншу та більшу сторону на половину кроку діапазону.

5. Для всіх значень визначеного у попередньому кроці діапазону потоку повітря повним перебором визначаємо коефіцієнти звукопоглинання за моделлю Мікі.

6. Вибираємо значення коефіцієнта опору потоку повітря для якого RMSD є найменше або R<sup>2</sup> найбільше.

Для спрощення порівняння результатів, отриманих з імпедансної труби Bruel & Kjaer (рис. 6.14) і установки для продування повітрям пористих матеріалів пропонується розробити програмне забезпечення у якому реалізувати запропонований метод.



Рис. 6.14 Імпедансна труба (тип 4206, Brüel & Kjær)

Розроблено математичне забезпечення підсистеми, яке включає у себе алгоритм роботи, який представлений на рис. 6.15. Для програмної реалізації підсистеми вибрано систему MatLab, яка має один з найпотужніших математичних апаратів, проводить обчислення з подвійною точністю, а останні версії дають змогу проектувати зручні інтерфейси користувача.



Рис. 6.15 Алгоритм роботи інверсного методу визначення опору потоку

повітря

На рис. 6.16 показано головне вікно розробленої підсистеми. На першому кроці користування підсистемою необхідно вибрати файл результатів та зі списку вибрати матеріал для якого треба підібрати опір повітряному потоку. Поля мінімальної та максимальної товщини заповнюються автоматично шляхом отримання інформації з файлу результатів, хоча ці значення можна налаштувати вручну для відображення вибраного діапазону на графіку. Rs MIN і Rs MAX представляють діапазон значень опору повітряному потоку, в межах якого буде відбуватися пошук оптимального значення опору потоку повітря. Поділи означають кількість сегментів, які використовуються під час пошуку опору повітряному потоку. Параметр «Товщина» відповідає товщині матеріалу, зчитаної з файлу, і регулюється користувачем. Натисканням кнопки «Підібрати Rs » підсистема визначає опір повітряному потоку вибраного матеріалу.

承 Melnyk_MR		_	
	Рибрати фойд розидитатір		FN
	Биорати фаил результать		
Директорія	C:\Diser\!RH_09_08\6 розділ\		
Файл результатів	R_All orig.csv		UA
Список матеріалів	02_01cm 🔻	Log	1
f, [Гц] MIN	50 f, [Гц] МАХ 6400	Lin •	• Hist.
Rs MIN	1 Rs MAX 100000	R^2	RMSD
Степінь	15 Поділів 20	Експ.	1/3 Окт.
Товщина, [мм] 2	.5 ± 0.2 Відступ 10	мат.	м+п
Rs 6000	00 Графік Rs	Підібра	ти Rs
		R	P.

Рис. 6.16 Головне вікно підсистеми добору опору потоку повітря пористих матеріалів

Вхідними даними до підсистеми є файл результатів структури як показано на рис. 6.17. Перший рядок даного файлу це назва матеріалів, яка має бути інформативною, наступний рядок під назвою «Товщина повітряного зазору» - це рядок у якому необхідно вказати товщину повітряного зазору. Однак якщо користувача не введене тут дані, то їх пізніше можна буде ввести безпосередньо у підсистемі, або змінити чи уточнити. Наступний рядок під назвою «Товщина матеріалу» призначений для внесення відомостей про товщину у міліметрах матеріалу, який також є необов'язковим і ці дані можна ввести пізніше у підсистемі. У наступному рядку міститься інформація про коефіцієнти поглинання, а крайній правий рядок від них це частоти яким відповідає даний коефіцієнт поглинання. Вхідний файл відповідає файлу результатів з імпедансної труби фірми Bruel & Kjaer і одразу після проведення експериментів може бути опрацьований розробленою підсистемою.

	A	В	С	D	E	F	G	Н	1	
2	Name:	02_01cm	02_03cm	02_05cm	02_07cm	02_09cm	02_11cm	02_13cm	02_15	L
3	TubeType:	Combine	Comb							
4	Date:	43241	43241	43241	43241	43241	43241	43241	43	
5	Товщина повітряного зазору	10	30	50	70	90	110	130		
6	Товщина матеріалу	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	
7	2	7.2296E-0	-1.6000E+	-2.8597E+	-3.5913E-0	-1.2634E+	-3.6859E-0	-5.2910E+0	-1.605	
8	4	7.4267E-0	-5.1794E-0	-3.2243E-0	-6.7625E+	(4.0223E-0	-1.4894E-0	-7.3436E-C	-2.913	
9	6	2.7623E-0	-8.8474E-0	7.3310E-0	-3.6861E-0	1.6417E-0	-8.3708E-0	-7.5129E-(	-4.392	
10	8	8.0016E-02	-1.4019E-0	2.3097E-0	1.8347E-0	6.4058E-0	5.3632E-0	4.8859E-0	-1.191	
11	10	1.3392E-0	-1.0651E-0	1.5894E-0	1.2108E-0	8.5762E-0	-3.4718E-0	2.1884E-0	-3.740	
12	12	8.8815E-0	-1.0069E-0	3.0996E-0	-7.8833E-0	3.5404E-0	-9.7832E-0	-7.5580E-0	-1.114	
13	14	-2.9786E-0	-4.9751E-0	1.2180E-0	5.3697E-0	1.2923E-0	2.3650E-0	4.5208E-02	-1.361	
14	16	5.4828E-0	-1.0933E-0	6.6349E-0	-1.2517E-0	3.4343E-0	3.6878E-0	2.8752E-02	3.8513	
15	18	-5.2189E-0	-2.0563E-0	-3.4580E-0	2.0049E-0	7.8740E-0	1.5335E-0	-5.1077E-0	3.5423	
16	20	4.1936E-0	7.3703E-0	1.9734E-0	3.6385E-0	-3.0118E-0	2.6689E-0	4.5576E-02	4.0373	
17	22	5.3560E-0	-8.3349E-0	1.0664E-0	1.2770E-0	1.3032E-0	2.8889E-0	4.2730E-02	2.6339	
18	24	-2.3589E-0	-1.0188E-0	2.6747E-0	2.3671E-0	2.7800E-0	6.2187E-0	3.9691E-02	-2.312	
19	26	-4.2917E-0	1.0297E-0	3.9167E-0	2.4172E-0	2.3221E-0	8.3045E-0	2.1229E-02	-2.828	
20	28	5.0239E-0	-9.4714E-0	7.3904E-0	3.1473E-0	1.9041E-0	6.8589E-0	2.0212E-03	-1.859	
21	30	-6.0393E-0	-3.9820E-0	3.5231E-0	2.5155E-0	3.1544E-0	2.9718E-0	1.7151E-0	-6.540	
	К_All orig двоша	рові мате	ріали	+	: •	C 04055 0	0.04ECE 0			

Рис. 6.17 Файл вхідних даних до підсистеми визначення опору потоку повітря

Для контролю правильності добору передбачено графік рис. 6.18, який представляє етапи підбору опору потоку повітря. У підсистемі можна вибрати чи використовувати для підбору найменше середньоквадратичне відхилення *RMSD* чи коефіцієнт детермінації  $R^2$ . Приклад обчислення для 20 та 5 поділів представлено на рис. 6.18, а результат, той самий для двох випадків представлено на рис. 6.19. Як бачимо, після невеликої кількості ітерацій можна

знайти значення опору потоку, яке відповідає заданому коефіцієнту звукопоглинання. Роздільна здатність шкали  $1 \left[ \frac{\Pi a \cdot c}{M} \right]$ .

Дослідження показали, що для діапазону опору потоку повітря 0-100000 час повного перебору становить 520 *с* а час роботи запропонованого методу із поділом на 5 інтервалів становить 0,41 *с*. Результат при цьому ідентичний.



Рис. 6.18 Приклад знаходження найкращого результату при поділі діапазону пошуку на 20 частин справа та 5 зліва



Рис. 6.19 Результат пошуку опору продування потоком повітря

Для перевірки правильності роботи розробленого інверсного методу добору опору потоку повітря ми порівняли результати двох пористих матеріалів (див. рис. 6.20) отримані у імпедансній трубі та методом продуванням потоком повітря.



Рис. 6.20 Зразки, що аналізуються: Sinternm-FR та меламінова мочалка

На графіках (рис. 6.21а та б) показано порівняння значень коефіцієнта звукопоглинання, отриманих шляхом вимірювання в імпедансній трубці, та обчислених значень, за допомогою опору потоку, для найкращого співвідношення з результатами вимірювань. Представлені результати показують дуже хороше узгодження, що підтверджує можливість точного визначення коефіцієнта звукопоглинання на основі відомого опору повітряному потоку. Щоб мінімізувати помилку, важливо визначити цей параметр максимально точно.



Рис. 6.21 Значення коефіцієнта поглинання звуку, отримані в імпедансній трубці та обчислені за моделлю Мікі для відповідного опору потоку, a) Sinterm-FR, б) меламінова мочалка

Оскільки підсистема розроблялась для автоматизації опрацювання результатів, то наступним кроком розроблено програмний код, який дав змогу кожного разу після обчислень автоматично зберігати результати у вигляді графічних зображень у каталог в якому знаходяться вхідні дані. Приклад автоматично створених файлів результатів представлено на рис. 6.22. У назві файлів міститься інформація про назву матеріалу, його товщину та обчислений для даного матеріалу опір потоку повітря.

Також передбачено автоматичне копіювання всіх проміжних даних обчислень у буфер обміну, і їх можна після обчислень одразу зберігати наприклад до електронної таблиці ЕХСЕL. Приклад роботи функції копіювання результатів до буферу обміну і їх вставка в електронні таблиці показна на рис. 6.23. Як бачим до буферу копіюється товщина матеріалу, товщина повітряного прошарку, обчислений опір продування потоком повітря, в залежності від вибраного способу обчислення R<sup>2</sup> або RMSD та коефіцієнти звукопоглинання із вхідного файлу та обчислені на основі опору потоку повітря.

<b>⇒</b>	
<pre>Image: 02_01cm_Rs_63989_D_2.5</pre>	jpg
02_03cm_Rs_43668_D_2.5	jpg
<pre>Image: 02_05cm_Rs_42611_D_2.5</pre>	jpg
02_07cm_Rs_41478_D_2.5	jpg
02_09cm_Rs_40625_D_2.5	jpg
<pre>Image: 02_11cm_Rs_38545_D_2.5</pre>	jpg
02_13cm_Rs_37227_D_2.5	jpg
02_15cm_Rs_37494_D_2.5	jpg
02_17cm_Rs_38508_D_2.5	jpg
02 20cm De 20284 D 2 5	ina

Рис. 6.22 Список автоматично сформованих файлів результатів

	А	В	С	D
1	2,5	= D,mm	47804	
2	70	=D2,mm	0,055254	
3	f, Hz	a Input.	a Outout	
4	50	0,023097	0,007567	
5	52	0,043817	0,008128	
6	54	0,022323	0,008707	
7	56	0,03234	0,009301	
8	58	0,022161	0,009912	
9	60	0,005549	0,01054	
10	62	0,003614	0,011183	
11	64	0,009512	0,011843	
12	66	0,021689	0,012518	
13	68	0,026753	0,013208	
14	70	0,018991	0,013915	
15	72	0 018824	0.014636	

Рис. 6.23 Автоматично сформовані результати

# 6.5. Інверсний метод визначення питомого опору повітряному потоку шаруватих матеріалів

Інверсний метод також використовувався для розрахунку опору потоку двошарових матеріалів. Як і для пористих матеріалів, для визначення коефіцієнта звукопоглинання потрібна математична модель. Для пористих матеріалів передбачалося, що коефіцієнт звукопоглинання можна визначити для матеріалу, розміщеного на повітряному шарі товщиною L. Тому для визначення коефіцієнта звукопоглинання використана наступна модель, що описує акустичний імпеданс на поверхні матеріалу ( $z_w$ ), розміщеного на певній відстані.

$$z_{w} = \frac{-jz_{s0}z_{c}\cot(k_{c}D) + z_{c}^{2}}{z_{s0} - jz_{c}\cot(k_{c}D)},$$
(6.13)

де:  $z_{s0} = -jz_0 \cot(k_0 L)$  – поверхневий опір повітряного шару товщиною  $L, z_0 = \rho_0 c_0$ — акустичний опір повітря,  $k_0$  - хвильове число повітря,  $z_c$  ,  $k_c$  – характеристичний опір і хвильове число матеріалу покриття відповідно. Потім, використовуючи рівняння 6.11 і 6.12, розраховуємо коефіцієнт відбиття *R* і коефіцієнт звукопоглинання *α<sub>ti</sub>*. Значення опору повітряного потоку визначаємо інверсним методом шляхом знаходження мінімуму RMSD.

#### 6.6. Аналіз чутливості моделей пористих матеріалів

Аналіз чутливості проведено як для моделі пористого матеріалу, так і для моделі покриття, встановленої на повітряному шарі, щоб дослідити їх застосовність у зворотному методі. Аналіз чутливості моделей проводився для розрахунку коефіцієнта звукопоглинання до змін опору повітряному потоку, товщини пористого матеріалу та товщини повітряного проміжку за матеріалом. Для оцінки чутливості моделей визначено індекс чутливості *Si* за допомогою наступного співвідношення (9):

$$S_i = \frac{\partial \alpha_i}{\partial r_s} \frac{r_s}{\alpha_i} \tag{6.14}$$

де диференціал  $\frac{\partial \alpha_i}{\partial r_s}$  розраховано чисельно для коефіцієнта звукопоглинання  $\alpha_i$  для *i* -ої частоти для заданого опору потоку  $r_s$ . Індекс надає безрозмірну міру чутливості, показуючи, наскільки очікується зміна коефіцієнта звукопоглинання у відповідь на одиницю зміни питомого опору потоку. Більше значення  $S_i$  вказує на більшу чутливість, тобто невеликі варіації питомого опору потоку можуть призвести до значних змін звукопоглинальних властивостей матеріалу.

Проведено аналіз пористих матеріалів з низьким опором повітряному потоку (rs=5000 Па/м<sup>2</sup>), середнім опором повітряному потоку (rs=15000 Па/м<sup>2</sup>) і високим опором повітряному потоку (rs=50000 Па/м<sup>2</sup>) для двох різних товщин матеріалів: 15 мм і 30 мм (рис. 6.24 а, б). Для шаруватого матеріалу (товщина D = 2,5 мм) аналіз проводився без повітряного відступу за матеріалом і для повітряної відстані L = 100 мм за матеріалом (рис. 6.24 в, г).

На основі отриманих результатів визначено діапазони частот, де коефіцієнт звукопоглинання є найбільш чутливим. Результати також були використані для формулювання рекомендацій щодо інверсного методу визначення опору потоку.



Рис. 6.24 Показники чутливості коефіцієнта звукопоглинання до зміни опору потоку для пористих матеріалів і шаруватих матеріалів в різних діапазонах опору потоку. Для пористих матеріалів розрахунки проводили для товщини матеріалу a) D =15 мм i b) D =30 мм. Для шаруватих матеріалів товщиною D =2,5 мм розрахунки проводились для двох способів розміщення: в) без зазору за матеріалом L =0 мм i г) з повітряним зазором L =100 мм.

Аналіз показує, що індекс чутливості коефіцієнта звукопоглинання  $S_i$  для пористих матеріалів змінюється з частотою і залежить від питомого опору потоку  $r_s$  і товщини матеріалу D (рис. 6.24 а, б). Для заданої товщини D і опору потоку гѕ можна спостерігати діапазон частот, в якому значення коефіцієнта звукопоглинання зростає від 0 до максимального значення. Аналіз чутливості показав, що в цьому діапазоні розрахований коефіцієнт звукопоглинання найбільш чутливий до змін опору повітряного потоку. Вище цього діапазону частот, де коефіцієнт поглинання досягає максимального значення, чутливість

до змін питомого опору повітряного потоку зменшується. Однак значення питомого опору потоку повітря визначає максимальне значення коефіцієнта звукопоглинання і частоту, на якій цей максимум виникає. У результаті значення та частота максимального коефіцієнта поглинання є вирішальними моментами для узгодження характеристик звукопоглинання.

З іншого боку, в діапазоні низьких частот можна спостерігати високі негативні значення індексу чутливості Si, що вказує на відносно великі зміни коефіцієнта поглинання. Однак абсолютна зміна коефіцієнта звукопоглинання невелика. Таким чином, у цьому діапазоні частот вплив опору потоку є мінімальним, що робить його менш значущим при узгодженні характеристик поглинання з виміряними значеннями. Для підвищення точності визначення питомого опору потоку інверсним методом коефіцієнта звукопоглинання до вимірювання в імпедансній трубці доцільно результатів проводити узгодження частот. Це повинно В широкому діапазоні включати характеристики, що охоплюють як діапазон, де коефіцієнт поглинання збільшується, так і локальний максимум коефіцієнта звукопоглинання.

Для тонких матеріалів і шаруватих матеріалів частота, на якій виникає максимум, може бути за межами діапазону вимірювання (рис. 6.24 в, г). З цієї причини краще порівнювати їх за допомогою зразка, розміщеного за повітряним простором за ним. Повітряний простір за матеріалом спричинив зміщення максимумів коефіцієнта поглинання в бік нижчих частот і розширення частотного діапазону, де чутливість висока, і це дає змогу краще узгоджуватись у ширшому частотному діапазоні (рис. 6.24 г).

### 6.7. Дослідження розроблених методів

Для дослідження розроблених методів вибрано сім різних видів товстих пористих матеріалів, які використовуються в основному як наповнення акустичних панелей, і два тонкі матеріали – поліефірні тканини, які найчастіше використовується як покриття акустичних панелей або оббивка меблів (рис. 6.25).



Рис. 6.25 Опис досліджуваних зразків

Опір потоку повітря тонких матеріалів визначали за допомогою обох описаних методів. Для інверсного методу спочатку проводили вимірювання звукопоглинання матеріалу з повітряним простором за зразком. Вимірювання проведено для двох різних поліефірних тканин з волокнами різного діаметру та, можливо, різним питомим опором повітряному потоку. Щоб виміряти коефіцієнт звукопоглинання, дві тканини були розміщені на задній частині імпедансної трубки на дистанційному кільці, щоб підтримувати бажану

273



Рис. 6.26 Коефіцієнт звукопоглинання тканини товщиною 2,5 мм, де L – повітряний простір за зразком, а f – діапазон частот.

Підбір коефіцієнтів опору потоку повітря проводився окремо для трьох частотних діапазонів: f = 50-1600 Гц, що відповідає вимірюванням в імпедансній трубці великого диметра ( $\emptyset = 100$  мм), f = 1600-6400 Гц (мала імпедансна трубка,  $\emptyset = 29$  мм), та для широкого діапазону частот f = 100-6400 Гц.

Як показують дослідження, зміна відстані за зразком *L* призводить до появи більшої кількості локальних максимумів, пов'язаних з виникненням чвертьхвильових резонансів (рис. 6.26). У інверсному методі вони є

важливими точками, завдяки яким можна досягти точнішого підбору. Вибір діапазону частот, для якого проведено підбір, також є важливим. Результати вимірювань у великій імпедансній трубі включають як діапазон, у якому коефіцієнт поглинання зростає, так і локальні максимуми, що залежать від відстані L. Результати з великої труби, здебільшого містять локальні максимуми, і не завжди охоплюють діапазон, у якому починається зростання коефіцієнта поглинання від 0. Вибір широкого діапазону частот забезпечує отримання інформації як про зростання коефіцієнта поглинання, так і про локальні максимуми. У результаті вибір відстані за зразком L та діапазону частот впливає на опір потоку, визначений інверсним методом.

Вплив повітряного простору L за матеріалом на розрахунок опору повітряному потоку за допомогою інверсного методу показано на рис. 6.27.



Рис. 6.27 Опір повітряному потоку пористих матеріалів залежно від повітряної порожнечі за вимірювальним зразком і діапазону частот (імпедансна труба).

Аналіз показав, що фетр товщиною 3 мм складається з тонших волокон і має значно більший опір повітряному потоку. Для великої імпедансної труби

результати в основному нижчі, ніж для маленької труби. Результати розрахунків, виконаних для широкого діапазону частот, є середнім опором повітряного потоку, отриманим для великої та малої труби (рис. 6.27). Отримані результати опору повітряному потоку відрізняються в основному для повітряних зазорів 10мм і 50мм для обох тканин. Для решти повітряних зазорів результати суттєво не змінилися зі зміною *L*. Це підтверджує, що повітряний зазор за матеріалом покращує повторюваність визначених значень опору потоку за допомогою інверсного методу.

У таблиці 6.2 показано порівняння результатів вимірювання опору повітряного потоку, отриманих обома методами. Результати для інверсного методу є середніми значеннями, розрахованими для всіх варіантів повітряних зазорів. Для тканини товщиною 2,5мм визначені значення опору повітряному потоку є подібними, а для тканини товщиною 3 мм значення, отримані методом вимірювання алгоритму PLA, на 40 % вищі, ніж інверсним методом.

Таблиця 6.2

Nr	Матеріал	Густина	Товщина	$r_s \Pi a^* c/m^2$	$r_s \Pi a^* c/M^2$
		ho кг/м <sup>3</sup>	<i>D</i> мм	(імпедансна	(PLA -
				труба)	статичний
					потік повітря)
1	Поліестеровий	120	2.5	48011	36864
	фетр I				
2	Поліестеровий	170	3.0	115045	142189
	фетр II				

Опір повітряному потоку досліджуваних покриттів.

Порівняння коефіцієнтів звукопоглинання, розрахованих для опору потоку, визначеного обома методами, показано на рис. 6.28. Результати коефіцієнтів звукопоглинання, розрахованих і виміряних для фетру товщиною 3 мм на відстані 70 мм, добре збігаються для середніх і високих частот. Більші відмінності (не більше 0,1) спостерігаються для частот нижче 500 Гц. Це означає, що модель не дуже чутлива до зміни питомого опору повітряного потоку і значення коефіцієнта звукопоглинання можна визначити з достатньою точністю.



Рис. 6.28 Коефіцієнти звукопоглинання, виміряні та розраховані на основі питомого опору повітряному потоку, визначеного за допомогою інверсного методу та вимірювання питомого опору повітряного потоку (метод PLA) для поліестрового фетру товщиною 3 мм, встановленого на повітряному зазорі 70мм

## 6.8. Пористі матеріали для заповнення акустичних панелей

У таблиці 6.3 наведено значення опору повітряного потоку, отримані інверсним методом та методом повітряного потоку (метод PLA) для широкого діапазону частот. Аналіз опору повітряному потоку показує, що для матеріалів з низькими питомими опорами повітряному потоку (близько 10000 Па\*с/м<sup>2</sup>) відмінності у визначених значеннях опору повітряному потоку не перевищують десятків відсотків. Різниця між значеннями, отриманими двома методами, зростає зі збільшенням значень питомого опору повітряного потоку. Для мінеральної вати зі скловолокном різниця досягає 50%. Опір повітряному потоку матеріалів, що використовуються для заповнення

Nr	Матеріал	Густина	Товщина	$R^2$	$r_s [\Pi a^* c/M^2]$	$r_s [\Pi a^* c/m^2]$	Відносна
		ρ	<i>D</i> [мм]		(Імпедансна	(Статичний	похибка
		[кг/м <sup>3</sup> ]			труба)	потік	δ
						повітря)	[%]
1	Поліефірна тканина	45	30	0,993	2436	2435	0,04
	Ι						
2	Поліефірна тканина	25	30	0,973	5024	4840	3,80
	II						
3	Мінеральна вата зі	50	30	0,983	16474	30755	46,43
	скловолокном						
4	Скловата	125	20	0,960	102893	81700	25,94
5	Пінополіуретан	15	20	0,965	5099	5040	1,17
	(CME=CV)						
6	Меламінова піна І	9	17	0,995	6941	7922	12,38
7	Меламінова піна II	9,6	30	0,988	8701	8652	0,57

#### акустичних панелей

Однак порівняння значень коефіцієнта звукопоглинання, визначених і виміряних для мінеральної вати показує хороший збіг (рис. 6.29а).





Найбільші відмінності між визначеними значеннями не перевищують 0,1 і спостерігаються для середніх і високих частот. Для покращення узгодження слід розглянути можливість використання іншої обчислювальної моделі, спеціально призначеної для скловолокна. Для шаруватих матеріалів розрахункова модель не дуже чутлива до зміни питомого опору повітряного потоку, і навіть для великих змін питомого опору повітряного потоку значення коефіцієнта звукопоглинання можна визначити з хорошою точністю.

### 6.9. Метод синтезу акустичних матеріалів

Проведені дослідження розробленого інверсного методу визначення коефіцієнтів опору потоку повітря на основі коефіцієнтів звукопоглинання показали, що даний метод відкрив нові можливості для синтезу акустичних матеріалів та добору їх товщини з метою отримання оптимальних характеристик.

Запропонований метод синтезу включає такі кроки:

- 1. Вибір необхідного коефіцієнта звукопоглинання для конкретного акустичного застосування.
- Встановлення бажаного діапазону частот, на яких матеріал повинен ефективно поглинати звук.
- 3. Використання розробленого інверсного методу для визначення опору повітряному потоку пористого матеріалу, що синтезується.
- 4. Визначення оптимальної товщини матеріалу для досягнення бажаного коефіцієнта поглинання використовуючи модель Мікі.
- 5. Виготовити матеріал розрахованої у попередніх кроках товщини і опору потоку повітря.
- 6. Перевірити синтезований матеріал в реальних умовах або на спеціалізованих тестових стендах.

Метод добору акустичних матеріалів дає змогу використовуючи інверсний метод, базу наявних матеріалів та їх частотно-залежну характеристику коефіцієнтів звукопоглинання підібрати товщину матеріалу, яка найкраще відповідатиме бажаним характеристикам звукопоглинання у заданому частотному діапазоні. Для прикладу вибравши файл із заданими коефіцієнтами поглинання для відповідних частот та задавши, яка товщина синтезованого матеріалу має бути, а також на скільки вона може змінюватись. У нашому випадку на 20 мм як показано на рис. 6.30 та запустивши на виконання натиснувши кнопку Підібрати Rs ми підберемо матеріал із заданими характеристиками. Результат показано на рис. 6.31. Тут синьою лінією на графіку показаний коефіцієнт звукопоглинання який ми хочемо отримати, а червоною, яку характеристику матиме підібраний матеріал товщиною 29,7 мм та опором потокові повітря 4954.



Рис. 6.30 Добір товщини матеріалу



*Рис. 6.31 Результати синтезу матеріалу добираючи товщину, що відповідає заданим характеристикам звукопоглинання* 

Для ситуації, коли у нас є, наприклад, меламінова мочалка товщиною 30 мм із заданим коефіцієнтом опору потокові повітря 24950, і необхідно визначити, яку товщину відрізати, щоб отримати задані коефіцієнти поглинання, вказуємо діапазон пошуку товщини, також можна обмежити діапазон добору Rs MIN та Rs MAX як показано на рис. 6.32.

Результати добору товщини матеріалу, що відповідає заданим характеристикам звукопоглинання представлено на рис. 6.33. Так результат не ідеальний, але ми взяли будь-який матеріал і за 0,61 с визначили, що якщо ми візьмемо його товщиною 18,8 мм, то отримаємо найбільш наближену характеристику звукопоглинання, до тої, яку хотіли отримати. Якщо додати базу матеріалів і здійснювати пошук за опором потокові повітря, то можна ефективно добирати матеріали із заданими акустичними характеристиками.

280



Рис. 6.32 Встановлення параметрів синтезу



Рис. 6.33 Результати синтезу матеріалу добираючи товщину матеріалу, що відповідає заданим характеристикам звукопоглинання

Розроблений метод синтезу акустичних матеріалів дав змогу синтезувати акустичні матеріали із заданими коефіцієнтами звукопоглинання, використовуючи розроблені інструменти.

#### 6.10.Висновки до 6 розділу

Дослідження показали, що обидва методи, які використовуються для визначення питомого опору потоку пористих матеріалів із густиною в діапазоні від 9,6 кг/м<sup>3</sup> до 45 кг/м<sup>3</sup> дають змогу точно розрахувати коефіцієнт звукопоглинання. Однак похибки зростають під час визначення опору потокові повітря матеріалів з великою густиною та високим опором потокові повітря. Цілком можливо, що ця проблема спричинена потоком повітря через пори між зразком матеріалу та монтажним тримачем у методі продування повітряним потоком. Однак, незважаючи на ці відмінності, вони суттєво не впливають на розрахункові значення коефіцієнта звукопоглинання. У результаті вимірювання опору потоку за допомогою статичного повітряного потоку можна використовувати запропонований метод для визначення коефіцієнта звукопоглинання матеріалів або їх шаруватих конфігурацій без необхідності проведення експериментів у ревербераційній камері чи імпедансній трубі. Цей метод можна застосовувати для попередньої оцінки коефіцієнтів звукопоглинання та вибору матеріалу.

З іншого боку, під час вимірювання коефіцієнта звукопоглинання в імпедансній трубі можна визначити питомий опір потоку досліджуваного матеріалу за допомогою інверсного методу. Цей підхід особливо корисний для подальшого аналізу коефіцієнта звукопоглинання на основі розрахунків, наприклад, для багатошарових конфігурацій матеріалів або вибору покриттів для наповнювачів.

Розроблено інверсний метод визначення опору потокові повітря пористих матеріалів використовуючи модель Мікі, який дав змогу представити коефіцієнти звукопоглинання, в діапазоні чутних частот одним числом опором потоку повітря, що дало змогу порівнювати результати визначення

коефіцієнтів звукопоглинання отриманими із імпедасної труби та лабораторної установки продуванням потоком повітря пористих матеріалів.

Модифікований лабораторний стенд для вимірювання опору потоку пористих матеріалів за допомогою використання давачів MEMS дав можливість підвищити точність вимірювань через збільшення кількості вимірюваних даних та їх усереднення.

Удосконалено метод визначення опору потокові повітря, який описує залежність між швидкістю повітряного потоку та перепадом тиску ( $q(\Delta p)$ ), шляхом вибору діапазону даних для лінійної апроксимації, використовуючи функцію залежності опору повітряному потоку до швидкості повітряного потоку, що дало змогу підвищити точність та повторюваність вимірювань порівняно з раніше використовуваним підходом.

Розроблено метод синтезу акустичних матеріалів, який дав змогу використовуючи інверсний метод підібрати товщину та опір потоку повітря синтезованого пористого матеріалу для отримання необхідних коефіцієнтів звукопоглинання в заданому діапазоні частот.

Результати, як для тканинних матеріалів, так і для грубших пористих матеріалів показують, що відмінності у визначених значеннях питомого опору повітряному потоку розробленими методами та програмним забезпеченням для матеріалів з малою густиною до  $\rho < 50$  кг/м<sup>3</sup> не перевищують 15%. Однак для матеріалів з більшою густиною  $\rho > 50$  кг/м<sup>3</sup> відмінності можуть досягати 50%.

Водночас, порівняння коефіцієнтів звукопоглинання, розрахованих на основі значень питомого опору повітряного потоку, отриманих двома методами, зі значеннями, виміряними в імпедансній трубі, показали, що ці відмінності суттєво не впливають на значення коефіцієнта звукопоглинання.

Дослдіжено вплив методу монтажу тонких і покривних матеріалів на точність визначення питомого опору повітряного потоку за допомогою інверсного методу. Виявлено закономірність, що монтаж матеріалу з повітряним простором позаду зразка дає змогу отримати точніші результати. Для досягнення повторюваних результатів потрібна мінімальна відстань 70 мм.

Результати досліджень свідчать про те, що розбіжності у визначених значеннях питомого опору повітряному потоку суттєво не впливають на коефіцієнт звукопоглинання для пористих матеріалів товщиною приблизно до 30 мм. Отже, обидва методи можна застосовувати для визначення питомого опору повітряному потоку та використовувати цей параметр для моделювання звукопоглинання пористими матеріалами та їх шаруватими конфігураціями, включаючи оббивні покриття, без необхідності повторних вимірювань конкретних конфігурацій. Це значно прискорить процес вибору матеріалів і покриттів для конкретних цілей.

Однак слід зазначити, що для товстих пористих матеріалів вплив питомого опору повітряного потоку на розрахункові значення коефіцієнта звукопоглинання буде більшим.

#### **РОЗДІЛ 7**

# ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ДОБОРУ АКУСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА МАТЕРІАЛІВ

У розділі інформаційну сьомому наведено модель системи автоматизованого добору звукоізоляційних матеріалів, яка вперше розроблена автором з урахуванням можливостей інтеграції з базами даних та експортом до САД-систем [22, 47]. Описано структуру підсистеми класифікації матеріалів, підсистему оцінювання акустичної якості оперних і концертних залів за методом Беранска [18, 30], а також принципи формування адаптивних звітів. Зроблено можливостях масштабування, акцент на гнучкого налаштування та економії часу в проєктних роботах.

# 7.1. Архітектура системи автоматизованого добору акустичних параметрів та матеріалів

Під час проєктування акустичних систем та виборі матеріалів використовуються системи, які включають модулі для збору даних, опрацювання, аналізу та рекомендацій. На основі проведеного аналізу в дисертаційні роботі сформульовано алгоритм побудови системи автоматизованого добору акустичних параметрів, що включає наступні етапи [294-296]:

1. Збір інформації та задання вхідних даних. Системи починають роботу з визначення параметрів простору та вимог до акустики. Це може включати розміри приміщення, призначення (наприклад, театр або студія звукозапису), і очікувані акустичні характеристики. Інформація може збиратися через інтерфейси введення даних або автоматично через інтегровані сенсори.

2. Опрацювання зібраної інформації та її аналіз. На цьому етапі система використовує алгоритми для аналізу поданих даних. Вона може порівнювати введені параметри з базою даних наявних акустичних матеріалів, оцінюючи їх здатність задовольнити потреби конкретного простору. Розширений аналіз

може включати моделювання акустики приміщення з використанням методів обчислювальної акустики, таких як метод скінченних елементів (FEM).

3. Проведення акустичного моделювання. Центральна частина багатьох сучасних систем базується на технологіях моделювання, які дають можливість візуалізувати акустичні умови простору та звукові поля. Ці моделі можуть бути статичними або інтерактивними, надаючи можливість змінювати параметри та відразу бачити результати модифікацій.

4. Автоматизоване формування рекомендацій. Після аналізу та моделювання, система може запропонувати рішення для оптимізації акустики приміщення. Це може включати вибір матеріалів, їх розміщення та інші акустичні втручання. Рекомендації можуть базуватися на різних типах алгоритмів.

5. Інтеграція систем у реальні проекти. Зазвичай, це включає експорт даних у різні формати, інтеграцію з САД-системами або системами керування будівництвом.

6. Вибір інновацій та перспективи розвитку. Оцінюються нові дослідження та технологічні досягнення, які можуть вплинути на подальшу еволюцію систем автоматизованого добору акустичних параметрів. Це може включати розробки у сферах штучного інтелекту та машинного навчання, перспективні акустичні матеріали та інноваційні методи моделювання.

Розуміння та аналіз цих аспектів важливі для визначення поточного стану інформаційних моделей у галузі акустики та визначення можливостей для їх подальшого розвитку.

Для розроблення ефективної загальної системи автоматизованого добору акустичних параметрів та матеріалів, важливо створити чітку, модульну та гнучку архітектуру. Для запропонованої системи використали таку архітектуру:

1. Рівень даних спільний для всіх підсистем:

- база даних ізоляційних матеріалів;

- база даних добору звукоізоляціних матеріалів;

- база даних акустичних матеріалів: зберігання інформації про різні акустичні матеріали, їхні властивості та характеристики;

- база даних акустичних параметрів: інформація про різноманітні акустичні параметри, що підлягають аналізу та оптимізації;

- база даних методу Беранека.

2. Рівень логіки застосунку:

модуль опрацювання даних забезпечує інтеграцію і опрацювання даних
 з різних джерел. Він відповідає за перевірку, нормалізацію та опрацювання
 вхідних даних,

- модуль автоматизованого добору та рекомендації щодо звукоізоляційних матеріалів, використовує алгоритми для аналізу акустичних умов та видачі рекомендацій щодо налаштувань та звукоізоляціних матеріалів,

- модуль розрахунку акустичних параметрів складається із алгоритмів та моделі на базі фізичних законів і математичних формул для розрахунку оптимальних акустичних рішень,

- модуль автоматизованої класифікації матеріалів, що використовує ієрархічний метод,

- модуль розрахунку рейтингу акустичного залу за методом Беранека та аналіз результатів,

- АРІ для інтеграції з другорядними системами та обміном даними з зовнішніми застосунками.

3. Рівень інтерфейсу користувача

- адміністративна панель для управління базами даних, налаштування систем і моніторингу загального стану системи,

- інтерфейс для кінцевих користувачів (інженерів, акустиків), де можна вводити параметри проекту, вибирати матеріали та переглядати рекомендації.

4. Інтеграція з вимірювальними інструментами

- вимірювальні інструменти та моніторинг забезпечують інтеграцію з вимірювальними інструментами, що вимірюють акустичні умови в реальному часі, для надання актуальних даних для аналізу та вдосконалення.

#### 5. Безпека та доступ

- модуль безпеки забезпечує авторизацію та аутентифікацію користувачів, щоб захистити чутливу інформацію.



Рис. 7.1 Архітектура системи

Ця архітектура є масштабованою та гнучкою, а також має можливість інтеграції з іншими системами або платформами як внутрішніми, так і зовнішніми.

З нашої точки зору є сенс представити інформаційні моделі для кожної підсистеми. Це дає змогу детальніше оцінити процеси, які відбуваються у кожній підсистемі, та сприяє кращій інтеграції між ними. Кожна підсистема
має свої специфічні вимоги та задачі, тому деталізовані інформаційні моделі допоможуть наступним чином:

1. інформаційні моделі допомагають у визначенні та структуризації процесів, які відбуваються у кожній підсистемі. Це дає можливість краще розуміти взаємозалежності та оптимізувати ці процеси,

2. розробка окремих інформаційних моделей кожної підсистеми дає змогу спроектувати спеціалізовані компоненти, які точно відповідають конкретним потребам кожної підсистеми, що підвищує ефективність системи в цілому,

3. використання чітко визначених на модельному рівні підсистем спрощує процес інтеграції. Інформаційні моделі деталізують інтерфейси і взаємодії між підсистемами, що знижує ризик помилок та непорозумінь при їх взаємодії,

4. інформаційні моделі підсистем дають можливість краще управляти змінами в процесах. Якщо потрібно буде зробити модифікацію в одній підсистемі, чітке розуміння її моделі допоможе оцінити вплив цієї зміни на інші підсистеми,

5. окремі моделі для кожної підсистеми дають змогу точніше оптимізувати ресурси, виділені для кожного компоненту системи, забезпечуючи більшу ефективність та зниження витрат.

Кожна підсистема вносить свій внесок у загальну функціональність системи автоматизованого добору акустичних параметрів та матеріалів, і чітке розуміння кожної з них через інформаційні моделі є ключем до успіху загальної системи.

Методологія моделювання інформаційних систем для автоматизації добору акустичних параметрів та матеріалів має специфічні аспекти та відмінності, які відрізняють її від загальних методологій моделювання інших інформаційних систем. Проаналізувавши [297-301] можна виділити такі ключові відмінності:

1. акустичні системи вимагають специфічного розуміння фізичних законів звуку і вібрацій, що впливає на визначення вимог і підбір відповідних технологій для моделювання і аналізу,

2. необхідність інтеграції спеціалізованих акустичних моделювальних інструментів та алгоритмів, які відтворюють поведінку звукових хвиль в різних середовищах,

3. системи для акустичних параметрів мають задовольняти високі стандарти точності, оскільки помилки в розрахунках можуть значно вплинути на якість акустичного середовища,

4. аналіз акустичних параметрів вимагає опрацювання великих обсягів даних, особливо під час тривимірного моделювання звукового поля, що вимагає застосування потужних обчислювальних систем і ефективних методів оптимізації,

5. інтерфейси користувачів у системах для акустичних параметрів часто проектуються з урахуванням потреб фахівців-акустиків, що можуть мати високий технічний рівень розуміння,

6. часто потрібна тісна інтеграція з іншими інженерними та проектувальними системами, такими як САД-системи для архітектурного проєктування,

7. важливість точної валідації результатів, отриманих від системи, через фізичні вимірювання або за допомогою інших методів верифікації,

8. розробка часто вимагає тісної взаємодії між акустиками, програмістами, проектувальниками та іншими спеціалістами, що викликає додаткові складнощі у координації проектних робіт.

Таким чином, хоча загальні принципи моделювання інформаційних систем застосовні і до систем автоматизації добору акустичних параметрів, існує низка специфічних аспектів, які потребують спеціалізованих знань та підходів. Урахування цих особливостей є ключем до успішного проєктування та впровадження таких систем.

# 7.2. Інформаційна модель підсистеми класифікації акустичних матеріалів

## Місце інформаційної моделі підсистеми класифікації акустичних матеріалів в акустичному проектуванні

Якість звуку в приміщеннях залежить не лише від його геометричних параметрів, а й від властивостей матеріалів, що використовуються під час будівництва та облаштування. Архітекторам, під час проєктування будинків з акустичними властивостями важливо враховувати різні акустичні параметри, щоб забезпечити оптимальну якість звуку в конкретному середовищі. Нижче наведено деякі ключові акустичні параметри, які враховують в системах акустичного проєктування: коефіцієнт звукопоглинання ( $\alpha$ ), час реверберації (RT60), звукоізоляція, специфічний акустичний опір (Z), густина матеріалів ( $\rho$ ), модуль Юнга (E) і демпфування матеріалу, індекс сприйнятої якості звучання (STI, Speech Transmission Index).

Для того, щоб точно визначити час реверберації, необхідна інформація про акустичні властивості матеріалів, а саме, відомості про ревербераційний коефіцієнт звукопоглинання всіх матеріалів, які використані у приміщенні [43], або які планується використати, якщо приміщення на стадії проєктування.

Дослідження присвячені проєктуванню систем акустичних матеріалів та класифікації акустичних матеріалів мають довгу історію, як в Україні так і за її межами, і є предметом багатьох наукових і технічних публікацій [302], що підтверджує їх актуальність.

Так, наприклад, у роботі [303] обґрунтовано необхідність розроблення бази даних акустичних матеріалів для проєктування приміщень з акустичними властивостями, яка б мала полегшити розрахунок і проєктування промислових приміщень та будівель багатоцільового призначення.

Польські науковці теж обґрунтували доцільність створення бази даних акустичних матеріалів та розробили її модель [304-306]. Проте ця модель не відповідає класифікації матеріалів відповідно до ДСТУ Б В.2.7-183:2009 [307].

Враховуючи те, що є необхідність у підсистемі акустичних матеріалів, запропоновано розробити її інформаційну модель із врахуванням ДСТУ Б В.2.7-183:2009 [307].

Підсистема класифікації акустичних матеріалів є необхідним елементом під час акустичного проєктування, вносячи свій внесок в успішність реалізації проєкту та досягнення оптимального акустичного рішення. Нижче наведено аспекти використання підсистеми класифікації акустичних матеріалів під час акустичного проєктування:

•класифікація акустичних матеріалів допомагає ідентифікувати, які матеріали найкраще підходять для певних акустичних вимог. Це особливо важливо, коли є необхідність забезпечити певний рівень звукоізоляції або звукопоглинання, що може варіюватись залежно від типу приміщення, розміщення різних функціональних зон і специфічних акустичних цілей,

•ретельно класифіковані матеріали дають можливість архітекторам та дизайнерам краще планувати інтеграцію звукоізоляційних та звукопоглинальних систем у загальний дизайн простору. Оптимальний вибір матеріалів сприяє естетиці і функціональності, не відступаючи від акустичних параметрів проекту,

•класифікація допомагає у виборі акустичних матеріалів, які забезпечують максимальну ефективність відповідно до вартості. Такий підхід сприяє ефективнішому управлінню бюджетом проєкту, забезпечуючи вибір продуктивних, але водночас економічно прийнятних рішень. Також це важливо з точки зору сталого розвитку, де стає можливим вибір екологічних матеріалів без втрати якості,

•класифіковані за суворими критеріями матеріали забезпечують дотримання вимог норм та стандартів акустичного проєктування. Це сприяє забезпеченню безбар'єрності, безпеки і зручності для всіх користувачів простору,

•чітка та виразна класифікація акустичних матеріалів надає замовникам, архітекторам, інженерам і виконавцям повну інформацію щодо доступних

опцій та їхніх властивостей, що дає змогу краще ухвалювати рішення на кожному етапі акустичного проєктування.



Рис. 7.2 Місце інформаційної моделі підсистеми класифікації акустичних матеріалів в акустичному проектуванні

#### Рівень даних підсистеми

Дослідження систематизувало і розвинуло методологічний підхід до класифікації акустичних матеріалів, що дало змогу оптимізувати вибір матеріалів для конкретних застосувань на основі об'єктивних критеріїв та стандартів. Встановлено, що підсистема керування та класифікації акустичних матеріалів повинна містити і оперувати такими даними та знаннями про акустичні матеріали:

•система зберігання даних, яка документує акустичні властивості матеріалів, такі як звукоізоляція та звукопоглинання;

•структуру бази даних, адаптовану до потреб наукових досліджень, яка включає дані про матеріали, отримані в результаті лабораторних вимірювань; •база даних повинна містити стандартизовану інформацію, перевірену на достовірність, та містити графічні ілюстрації, де це потрібно;

•протоколи та правила збирання даних;

•архітектурні схеми та будівельні стандарти, пов'язані із акустичними матеріалами;

•категоризація акустичних матеріалів за призначенням, наприклад, звукопоглинаючі матеріали, захисні покриття, а також звукоізоляційні матеріали та вироби;

•класифікація акустичних матеріалів за структурою, яка включає волокнисті, пористі, перфоровані захисні покриття, захисні оболонки, пористо-губчасті матеріали, сипкі матеріали, рулонні покриття підлоги;

•перелік акустичних матеріалів з звукоізоляційними властивостями, наприклад, ековата, полімерні перфоровані листи, теплоізоляційні мати зі скляного штапельного волокна;

•стратегії забезпечення стійкості та якості, включно з збереженням показників якості;

•класифікація матеріалів за рівнем стискання (м'які, жорсткі, підвищеної жорсткості);

•класифікація за типом використовуваної сировини (органічна, неорганічна та змішана);

•перелік критеріїв оцінювання технічного рівня та стабільності показників якості.

Розглянуті аспекти даних та знань можна представити такими інформаційними сутностями:

•0AcousticMaterials – класифікація за призначенням (звукопоглинаючі матеріали; захисні покриття; звукоізоляційні матеріали та вироби);

•1AcousticMaterials – класифікація за структурою (волокнисті, пористі, захисні перфоровані покриття, захисні оболонки, волокнисті, пористі, пористо-губчасті, сипкі, рулонні покриття підлоги);

•2AcousticMaterials – список акустичних матеріалів (наприклад: ековата,полімерні перфоровані листи, мати теплоізоляційні зі скляного штапельного волокна тощо);

•AcousticMaterials – список акустичних матеріалів із звукоізоляційними властивостями;

•AcousticMaterialsP2 –зберігання показників якості;

•ApplicabilityQS – забезпечення зв'язку багато до багатьох між таблицями 0AcousticMaterials та Properties2;

•КСоmpressibility – класифікація матеріалів за стисканням (м'які, жорсткі, підвищеної жорсткості);

•KMaterials – класифікація за типом сировини (органічна, неорганічна, змішана);

•КStructure - класифікація за структурою (волокнисті, пористі, пористогубчасті, сипкі);

•Properties0 – список критеріїв (критерії технічного рівня, критерії стабільності показників якості);

•Properties1 – групи показників якості;

•Properties2 – список показників якості.

У результаті роботи спроєктовано логічну модель даних (див. рис. 7.3).



Рис. 7.3 Логічна модель даних

#### Рівень логіки підсистеми

Під час розроблення інформаційної моделі обрано ієрархічний метод для специфічних потреб роботи із акустичними матеріалами, в якому задана множина послідовно ділиться на підпорядковані підмножини, поступово конкретизуючи об'єкт класифікації. Сукупність одержаних груп при цьому утворює ієрархічну деревоподібну структуру у вигляді розгалуженого графа, вузлами якого є групи. Основними перевагами ієрархічного методу є забезпечення великої інформаційної ємності, простота застосування та можливість створення для об'єктів класифікації мнемонічних кодів, які несуть змістовне навантаження і покращують точність, ефективність і інші критичні параметри системи.

Класифікація акустичних матеріалів побудована на принципі функціонального призначення цих матеріалів. Основною класифікацією акустичних матеріалів є класифікація за акустичними показниками (див. рис. 7.4) [307].

Усі звукопоглинаючі матеріали повинні класифікуватися відповідно до державного стандарту ДСТУ Б В.2.7-183:2009 [307]. У цьому стандарті

вказано, що звукопоглинаючі властивості звукопоглинаючих матеріалів під час застосування у реальних конструкціях потрібно характеризувати середньоарифметичним ревербераційним коефіцієнтом звукопоглинання αs<sub>сер</sub>, який визначають для кожної з трьох діапазонів октавної смуги частот (низькі, середні та високі).



Рис. 7.4 Класифікація акустичних матеріалів за акустичними показниками

Аналіз наявної літератури дав можливість ідентифікувати значний пробіл у систематичному вказуванні класів звукопоглинаючих матеріалів, що ускладнює процес їх вибору для проектувальників та наукових дослідників [8, 9]. У відповідь на цю проблематику поставлено завдання розроблення та реалізації алгоритму автоматизованої класифікації акустичних матеріалів, блок-схему якого показано на рис. 7.5

Основа алгоритму полягає у встановленні класу звукопоглинання для частотних ліапазонів кожного 3 трьох на OCHOBI величини середньоарифметичного коефіцієнта ревербераційного звукопоглинання. Впровадження цього підходу V базу даних надасть можливість проектувальникам ефективно відбирати матеріали за класом звукопоглинання.

Комплексний процес класифікації акустичних матеріалів, який застосовано під час створення інформаційної моделі бази даних акустичних матеріалів, подано на рис. 7.6.



Рис. 7.5 Блок схема алгоритму автоматичної класифікації матеріалів відповідно до ДСТУ Б В.2.7-183



Рис. 7.6 Процес класифікації матеріалів

## Рівень інтерфейсу користувача

У якості СКБД використано MS Access, розроблено віконні форми, а для задач вибірки та класифікації - VisualBasic.



Рис. 7.7 Головне вікно доступу до даних

На рис. 7.8 представлено діаграму потоків форм, яка відображає шляхи взаємодії користувача із системою, тобто як можна доступитися до тієї чи іншої форми. Під час розроблення дотримано правила «трьох клацань мишею», тобто до будь-якої форми можна доступитися зробивши не більше трьох клацань.



Рис. 7.8 Діаграма потоків форм

Віконні форми дають змогу вносити та редагувати класи та підвиди акустичних матеріалів, які будуть використовуватися для фільтрування матеріалів за класами або підвидами відповідно до ДСТУ Б В.2.7-183, 2009.

Оскільки є багато показників якості і для різних типів акустичних матеріалів використовуються інші, то для внесення значень відповідного показника користувач може вибрати зі списку тільки ті, які потрібно, чи які відомі для даного матеріалу. Для задання показника якості можна його вибрати зі списку, або використати ієрархію форм, де у першій формі вибрати найменування критерію, потім вказати тип показника якості і вже потім відкриються усі показники якості, значення яких можна ввести для даного матеріалу.

Для перегляду та редагування списку матеріалів передбачена віконна форма представлена на рис. 7.9, яка дає змогу редагувати та додавати інформацію про акустичні матеріали.

Для швидкого пошуку матеріалів із необхідними властивостями передбачені фільтри за назвою матеріалу, джерелом звідки взято інформацію про матеріал, класом та коефіцієнтом поглинання у відповідній октавній частоті.

Під час проєктування бази даних передбачено експорт, який дає змогу властивості матеріалів, які нас цікавлять, експортувати у MS Excel для подальшого опрацювання. Для експорту необхідно відзначити матеріали, після чого, натиснувши відповідну піктограму внизу даного поля вибрані матеріали та їх властивості експортуються в MS EXCEL.

-8					Сп	исок аку	стични	х матер	іалів		
	Назва	Кла-ція	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Тип матеріалу Джерело
۲	двері зі склом	H3		0,25	0,2	0,1	0,05	0,04	0,05		v www.acoustic.ua
	Скло 68 мм			0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02		v www.acoustic.ua
	Скло 34 мм	H3		0,25	0,2	0,1	0,05	0,04	0,05		v www.acoustic.ua
	двері зі склом	C2B2		0,1	0,2	0,4	0,65	0,7	0,65		v www.acoustic.ua
	Вікно (скло одинарне)	H3		0.35	0.25	0,18	0.12	0.07	0.04		×
	Скло одинарне			0,035		0,027		0,02			×
	Скло зеркальне			0,035	0,025	0,019	0,012	0,07	0,04		×
	Піноскло з незамкнутими порами	H3C3B2		0,1	0,36	0,38	0,36	0,45	0,55		×
	Скловолокно товщиною 25 мм (щільність 15 кг / кв.м)		0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,07		✓ http://forum.integral.ru/download
	Вікно (скло одинарне)	H3		0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,03	СТАЦЕНКО Л.Г. Акустика студий за
	Скло жорстке масивне			0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02		СТАЦЕНКО Л.Г. Акустика студий зе
-	Boundy avec										



## Рис. 7.9 Список акустичних матеріалів

Рис. 7.10 Віконна форма вибору типу матеріалу

# 7.3. Інформаційна модель підсистеми автоматизованого добору звукоізоляційних матеріалів

## Місце інформаційної моделі підсистеми добору звукоізоляційних матеріалів в акустичному проектуванні

Підсистема автоматизованого добору звукоізоляційних матеріалів теж належить до складних інформаційних систем, яка використовує низку технологій і методів для ефективного вибору матеріалів згідно з вимогами до проєктів та специфікацій. Нижче наведені ключові аспекти інформаційної моделі:

1. Підсистема містить базу даних звукоізоляційних матеріалів, яка включає інформацію про фізичні та акустичні властивості матеріалів, вартість, відгуки виробників та користувачів, і рекомендації щодо використання.

2. Компонент для проведення розрахунків необхідної звукоізоляції залежно від конкретних умов застосування (наприклад, рівень галасу, тип приміщення тощо).

3. Простий та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який дає змогу користувачам вводити специфікації проекту та отримувати рекомендації з вибору матеріалів.

4. Використання алгоритмів для видачі оптимізованих результатів вибору матеріалів.

5. Інтеграція з програмним забезпеченням для проєктування дає можливість автоматично вставляти зазначені матеріали в проектні документи.

6. Модуль конфігурації проєкту, який дає змогу користувачам налаштувати певні параметри проекту, такі як розміри приміщення, типи приміщень, сценарії експлуатації тощо.

7. Можливість генерування звітів про вибір матеріалів, їх вартість, ефективність застосування, а також порівняльний аналіз різних матеріалів.

Підсистема не тільки надає рекомендації з вибору, а й забезпечує гнучкість, швидкість та точність під час добору матеріалів для гарантії належної звукоізоляції в різноманітних проектах.

Підсистема добору звукоізоляційних матеріалів є життєво важливою частиною акустичного проєктування. Ця підсистема відіграє ключову роль у забезпеченні необхідних акустичних характеристик простору, таких як оптимальний час реверберації, мінімізація шуму від зовнішніх джерел і контроль звукового тиску в середині приміщення. Нижче наведено аспекти використання підсистеми добору звукоізоляційних матеріалів під час акустичного проєктування:

•звукоізоляційні матеріали допомагають створити комфортні умови для користувачів, зокрема у концертних залах, театрах, аудиторіях тощо. Вони забезпечують мінімізацію впливу зовнішнього шуму та внутрішніх звукових перешкод, підтримуючи чистоту та ясність звучання,

•під час проєктування важливо вибрати матеріали, що відповідають місцевим та міжнародним стандартам акустичної ізоляції та безпеки. Це забезпечує дотримання правил і нормативів, що є обов'язковим під час проєктування публічних та приватних просторів, •вибір правильних звукоізоляційних матеріалів впливає на загальні акустичні параметри приміщення, включаючи час реверберації, затухання звуку і гучність. Ефективні матеріали забезпечують краще звучання і знижують необхідність вживання додаткових засобів звукоусилення,

•комплексний підхід до вибору звукоізоляційних матеріалів сприяє не тільки досягненню бажаних акустичних характеристик, а й здійсненню вартісних ефективних рішень. Це може включати використання сучасних технологій і матеріалів, які пропонують високу ефективність за доступною ціною,

•підсистема добору звукоізоляційних матеріалів повинна бути інтегрована з загальними цілями дизайну та архітектурою приміщення, забезпечуючи естетичний вигляд і функціональність без компромісів з акустичною ефективністю.



## Рис. 7.11 Місце інформаційної моделі підсистеми добору звукоізоляційних матеріалів в акустичному проектуванні

#### Рівень даних підсистеми

Для підсистеми автоматизованого добору звукоізоляційних матеріалів розроблено дві бази даних: базу даних ізоляційних матеріалів і базу даних підтримки підбору звукоізоляційних матеріалів.

Під час проєктування бази даних ізоляційних матеріалів здійснено детальний аналіз звукоізоляційних матеріалів на предмет їх ієрархізації, що дало змогу зменшити розмірність бази - реалізовано чотири рівня ієрархії. Розроблена логічна модель відображає 4 рівня ієрархії: це таблиці Materials1, Materials2, Materials3 та Materials4.

Під час проєктування бази даних підтримки підбору звукоізоляційних матеріалів здійснено детальний аналіз будівельних норм, після чого спроєктовано необхідні таблиці для збереження даних про допустимі рівні шуму, нормативні значення індексів ізоляції та багато інших.



Рис. 7.12 Логічна модель даних

r=									
l	1	ab7							
		IdTyr 👻				Тип забудови	*	Тип	забудов 🗸
	۲	1	Житлові	будинки (н	еза,	лежно від типу будівлі)			
	۰	2	Готелі						
	۰	3	Будинки	туристично	го г	призначення (туристичні готелі, пансіони, будинки відпочинк	y)		
	ŧ	4	Колекти	зні будівлі (	сту,	дентські будинки, школи-інтернати та шкільні гуртожитки, ро	бітничі гур		
	٠	5	Дитячі са	дки					
	Ę	6	Початков	зі та середн	і шн	коли			
		🕗 IdTyp	peRoon 🗸	Lp.	*	Rodzaj pomieszczenia 🗸	LAeqwew	D +	LAeqwew
			20	6.1		Школи		35	
			21	6.2		Салони		35	
			22	6.3		Учительські кімнати		35	
			23	6.4		Буфети		40	
			24	6.5		Шкільні коридори та кімнати для відпочинку		40	
		*	(Nº)						
	٠	7	Будинки	університе	тів т	га науково-дослідних установ			
	٠	8	Лікарні т	а медичні у	ста	нови			
	Ŧ	9	Офісні бу	дівлі					
	Ŧ	10	Будівлі с	удів та прон	vpa	מעדנ			
	ŧ	11	Всі вили	булівель					
*		(Nº)		- /					
		()							

Рис. 7.13 Внесення даних про нормативні значення допустимого рівня шуму у приміщеннях згідно ДБН [307] у таблицю Таb7

#### Рівень логіки підсистеми

Підсистема складається із таких модулів: внесення даних про звукоізоляційні матеріали, автоматичний розрахунок інших звукоізоляційних параметрів, вибірка та автоматична класифікація будівельних елементів (вікон, дверей, тощо) за різними класами звукоізоляційності, додавання нових приміщень, добір необхідних звукоізолюючих матеріалів за заданими критеріями, розрахунок звукоізоляції (формування звітів).

Для вибірки та фільтрування даних, спроектовано множину SQL-запити. На рисунку представлено приклад запиту, який здійснює перевірку, і ті параметри звукоізоляції, які не були внесені користувачем, розраховуються автоматично, якщо таке можливо.

MatAll Materials	×
SELECT Materials1.1dMaterials1, Materials2.1dMaterials2, Materials3.1dMaterials3, Materials4.Nr4, [Materials4] & IIf(Not IsNuII([M1]),"; *& [1] & `: *& [M1]) & IIf(Not IsNuII([M2]),"; *& [2] & `: *& [M2]) & IIf(Not IsNuII([M1]),"; *& [3] & `: *& [M3]) & IIf(Not IsNuII([M4]),"; *& [4] & `: *& [M4]) AS Mat1, Materials4.Rw, II(Not IsNuII([RA1R]), [RA1R], [RA1R], [RA1R], [RA1R], [RA1R], [RA2R], [RA2R], [RA2R], IRA2R], IIf(Not IsNuII([RA1]), [RA1R], [RA1R], [RA1R], [RA1R], [RA1R], [RA1R], [RA1R], [RA1R], [RA1R], [RA2R], [RA2R], IRA2R], IIf(Not IsNuII([RA1]), [RA1R], [RA1R], [RA1R], [RA1], 2 AS RA1R, IIf(Not ISNUII([RA2]), [RA2R], [RA2R], 2 AS RA2R, Switch([Materials1], [IdMaterials1] = 5, IIf([Materials4] Like **zewn*', IIf([Ra1] > = 44, 'Dz1-44', IIf([Ra1] > = 41, 'Dz1-41', IIf([Ra1] > = 38, 'Dz1-38', IIf([Ra1] > = 35, 'Dz1-35', IIf([Ra1] > = 35, 'Dz1-35', IIf([Ra1] > = 35, 'Dz1-35', IIf([Ra1] > = 20, 'Dz1-20', '))))))), IIf([RA1] > = 25, 'Dz1-35', IIf([Ra1] > = 35, 'Dz1-35', IIf([Ra1] > = 20, 'D1-20', '))))))), IIf(IRA1] = = 35, 'D21-35', IIf([Ra1] > = 30, 'D1-30', IIf([Ra1] > = 25, 'D1-25', IIf([Ra1] > = 23, 'DK1- 23', IIf([Ra1] > = 35, 'D1-35', IIf([Ra1] > = 32', 'DK1-32', IIf([Ra1] > = 25', 'D2-46', IIf([Ra1] > = 35', 'DK1-35', IIf([Ra1] > = 32', 'DK1-32', IIf([Ra1] > = 35', 'D22-35', IIf([Ra1] > = 35', 'DZ1-35', IIf([Ra1] > = 35', 'DZ2-35', IIf([Ra1] > = 35', 'D22-35', IIf([Ra1] > = 35', 'DZ2-35', IIf([Ra1] > = 35'	
Materials2. [IdMaterials2] = Materials3. [IdMaterials2] INNER JOIN Materials4 ON Materials3. [IdMaterials3] = Materials4. [IdMaterials3]) ON Materials1. IdMaterials1 = Materials2. IdMaterials1 WHERE (((Materials1   dMaterials1)   ike   f( s)u  ((Forms1)(MatAIII)(FM1)) *** (Forms1)(MatAIII)(FM1)) AND	
((Materials2.IdMaterials2) Like IIf(IsNull([Forms]![MatAII]![FM2]), **", [Forms]![MatAII]![FM2])) AND ((Materials3.IdMaterials3) Like IIf(IsNull([Forms]![MatAII]![FM3]), **", [Forms]![MatAII]![FM3])));	

Рис. 7.14 SQL-запит на вибірку та фільтрування даних

У підсистемі проводиться перевірка чи це зовнішня чи внутрішня конструкція. Залежно від типу конструкції використовують різні модулі розрахунку. На рис. 7.15 показано код програми на VisualBasic для визначення, яку форму необхідно відкрити.

```
Private Sub TypeIndicator_DblClick(Cancel As Integer)

If Forms!Report0.Report1.Form!TypeRep.Column(1) Like "*" & "BOBH" & "*" Then

If IsNull(Forms!Report0.Report1.Form!IdRpA2) Then

DoCmd.OpenForm "RpA2", acViewNormal, , , acFormAdd

Else

DoCmd.OpenForm "RpA2", acNormal, "", "[IdRpA2]=" & Me.[IdRpA2], , acNormal

End If

Else

DoCmd.OpenForm "Norma", acViewNormal, acEdit

End If

End If

End Sub
```

Рис. 7.15 Код програми на VisualBasic для визначення, яку форму необхідно

відкрити

Для автоматичного внесення у базу даних приміщень, які використовуються вперше у проєкті з метою їх використання у наступних проєктах розроблено код програми, який представлений на рис. 7.16.

```
Private Sub Pl_NotInList(NewData As String, Response As Integer)
Dim ButtonClicked
ButtonClicked = MsgBox("Такого типу приміщень немає в базі. Добавити " & NewData & " до бази?", vbYesNo)
If ButtonClicked = vbNo Then
Pl.Undo
Response = acDataErrContinue
Else
Response = acDataErrAdded
DoCmd.OpenForm "TypeRoom", , , , acDialog, NewData
End If
End Sub
```

Рис. 7.16 Код програми для додавання нових приміщень до бази даних

Для долучення даного проєкту до конструкторської документації архітектора необхідно сформувати звіт у форматі Microsoft Word. Для зменшення коду програми для формування звіту, розроблено шаблони, які є незмінними у кожному типі звіту, а решта формує програма написана на Visual Basic.

### Рівень інтерфейсу користувача

Для швидкого доступу до відповідних груп матеріалів розроблено інтерфейс користувача (рис. 7.17), де натиснувши відповідну піктограму одразу можна перейти до відповідної групи звукоізоляційних конструкцій або отримати доступ до всіх інших віконних форм та даних.



Рис. 7.17 Головне підсистеми

Детальний перегляд інформації про конкретну конструкцію відбувається через створені картки матеріалу чи звукоізолюючої конструкції, як показано на рис. 7.18.

😑 Властиво	сті констру	сції					-		×
Розділ:	1	Масив	ні стіни				 		
Група:	1.1	Стіни із	з звичайної цегли	1					
Підгрупа: 1.1.1. Одинарні стіни з твер <mark>н</mark> ої цегли, оштукатурені цементно-вапняною штукатуркою, товщиною близько 1,0 см						~			
Перегоро дка:	1.1.1.1	Одина	рні стіни різно	ї товщини					
товщи	іна стіни (б	ies	поверхнева мас	а стіни (без					
штун	катурки), с	м	штукатурки	ı), кг/м²					
	6,5		117						
F	Rw		RA1R	RA	2R	RA1	R	A2	
	40		39	3	7				

Рис. 7.18 Віконна форма редагування інформації про звукоізолюючі конструкції

Натиснувши кнопку Новий проект, відкриється вікно як на рис. 7.19. Для початку роботи необхідно вибрати варіанти конструкцій. Для одного проєкту можна використовувати потрібні конструкції необмежену кількість раз. Якщо є багато дверей, то необхідно у полі назва перегородки надати назву, спочатку номер поверху, потім номер дверей і т.д або позначення як у проекті. Основна задача віконної форми, як на рис. 7.19, визначити яка має бути ізоляційність і підібрати матеріали із рівною або більшою ізоляційністю. У програмі проводиться перевірка чи це зовнішня перегородка чи внутрішня, бо залежно від цього відкриваються інші форми для розрахунку.

-8	Формування зві	гу									_		×
ID	Дата	Година	Has	ва проекту					Комен	нтар			
4	23.01.2018	17:26:21	Проект			V	er. 3						WORD
		Тип пр	иміщень	Пр. №	1		Пр. №	2		Назва	перего	родки	-
		Зовнішн	є вікно 🗸	кімната		~			~				
		R'w	~ = 52	[dB] K =	2	[dB]	Rw	~ =	33	[dB]		RA,1,R	=30,
		згідно. Д	цБH-B.1.1-31 та	бл. 3. Lp. 26	. Житл	ові бу	динки: С	тіни і п	ерегор	одки л	ліж житл	товими	при
		[4.1.2.2] відповід	Однорамне ві но до АТ-15-33	кно та балк 584 / 2005: О	онні де днокіл	вері с инатн	истеми S і вікна та	КЈ-94 ла балко	амінов нні две	аного с рі сист	осново еми SKJ	го дереі -94,	ва
		Зовнішн	і двері 🛛 🗸	кафе		~ куз	кня		~				
		R'w	~ = 32	[dB] K =	2	[dB]	Rw	~ =	36	[dB]		RA,1,R	=34,
		згідно. Д	цБH-B.1.1-31 та	бл. 3. Lp. 29	. Житл	ові бу	динки: В	хідні д	вері кв	артир,	що вихо	одять на	асхо
		[5.1.5.1] (одноша	внутрішні две арові): двері з	рі DWA та D порогом DV	РА сис VA та D	теми )PA, о	Sokulka e бшивка ф	зідпові, фіброви	дно до 1х дощо	АТ-15-4 ок; рам	4941 / 20 а: дере	)08 в'яна аб	o
	SER.	Перекри	иття 🗸	кімната		~ гар	аж		~				
		L'n,w	~ = 60	[dB] K =	2	[dB]	L'n,w		64	[dB]		RA,1,R	=52,
	1000	згідно. Д	цБН-В.1.1-31 та	бл. 3. Lp. 3.	Житло	ві буд	цинки: Пе	ерекри	гтя між	примі	щенням	и кварт	ирі
▶		Внутріш	ні двері 🛛 🗸	кімната		~ ко	ридор		~ двер	i 2			
		R'w	~ = 32	[dB] K =	2	[dB]	Rw	~ =	37	[dB]	All 🖂	RA,1,R	=35,
		згідно. Д	цБH-B.1.1-31 та	бл. 3. Lp. 10	5. Навч	альн	і заклади	: Вхідн	і двері	із загал	ірного к	оридор	авн
		[5.3.13.2	] Двері вогнет	ривкі PONZ		78 Еле	ементи з	алюмін	нієвими	и профі	лями з		
		термічн	ими перервам	и відповідн	ю до Д	,БН-15	5 7540/20	08: Две	рі без г	юрогу;	наповн	ення	
*			$\sim$			$\sim$			$\sim$				
			~ =	[dB] K =	2	[dB]		~ =		[dB]	All 🔳		
													-

Рис. 7.19 Добір ізоляції конструкцій поточного проекту

# 7.4. Інформаційна модель підсистеми оцінювання акустичної якості оперних і концертних залів методом Беранека

Місце інформаційної моделі підсистеми оцінювання акустичної якості концертних залів в акустичному проектуванні

Метод Беранека відіграє важливу роль під час акустичного проєктування, особливо для концертних залів та оперних театрів. Цей метод базується на загальноприйнятій ідеї, що якість звуку в акустичному просторі має дуже велике значення і може бути оцінена за допомогою суб'єктивних і об'єктивних мір. Беранек у своїх дослідженнях зазначив, що сприйняття акустичної якості залежить від декількох ключових параметрів, включаючи час реверберації, час затримки першого відлуння, відстань від слухача до джерела звуку тощо.

309

У контексті акустичного проєктування, ми застосовуємо метод Беранека у фазі оцінки акустичної ефективності проектованих або реконструйованих приміщень. Завдяки цьому методу можна розрахувати, проаналізувати та передбачити результати з точки зору акустичної якості ще до втілення проекту в життя. Це особливо корисно для дизайнерів та акустичних консультантів, які прагнуть оптимізувати звукові властивості приміщень для досягнення найкращої акустичної атмосфери.

Квантифікація акустичної якості за методом Беранека дає змогу проектувальникам вибрати найбільш ефективні матеріали та конструкційні рішення, а також враховувати фактори зовнішнього середовища і тип музики, яка буде виконуватися у цьому просторі. Цей метод інтегруються в ширші системи проєктування для забезпечення комплексного підходу до акустичного дизайну.

Використання методу Беранека в акустичному проєктуванні, таким чином, не тільки сприяє створенню естетично і функціонально прийнятних акустичних просторів, а й є ключовим елементом у забезпеченні найвищої якості звучання для концертних залів та оперних театрів.



*Рис. 7.20 Місце інформаційної моделі підсистеми оцінювання акустичної якості оперних і концертних залів методом Беранека в акустичному* 

#### проектуванні

#### Рівень даних підсистеми

Для підтримки системи оцінювання акустичної якості оперних і концертних залів за методом Беранека, розроблено логічну модель підсистеми (рис. 7.21), яка включає наступні основні сутності:

•Halls – зберігає інформацію про концертні зали і оперні театри, їх розміщення і характеристики, такі як назва залу, місцезнаходження залу, об'єм залу в кубічних метрах, кількість місць для сидіння у залі.

•AcousticParameters – включає перелік акустичних показників, які використовують для вимірювання характеристик залу, таких як час реверберації та затримка першої відбивної хвилі, одиниці вимірювань цих показників.

•Measurements – містить детальні дані про вимірювання акустичних показників у різних залах, такі, як ідентифікатор залу, в якому проводилось вимірювання, ідентифікатор показника, який вимірювався, значення вимірювання, дата проведення вимірювання.

•MusicEvents – зберігає інформацію про різні музичні події, які відбулися в залах, зокрема оперні вистави та концерти, такі як, ідентифікатор залу, де відбулася подія, тип події (наприклад, опера або концерт), дата проведення події.

•Ratings – зберігає оцінки акустичних вимірювань, які надаються згідно з різними критеріями, заданими за методом Беранека, такі як, ідентифікатор вимірювання, на основі якого давалась оцінка, ідентифікатор критерію, за яким оцінювалась якість, бали, отримані за відповідний критерій.

•RatingCriteria (Критерії оцінювання) – містить перелік критеріїв, які використовуються для оцінки акустичної якості залів, кожен критерій має певний ваговий коефіцієнт, що впливає на загальну оцінку.



Рис. 7.21 Логічна модель даних

Розроблена логічна модель даних забезпечує систематичний підхід до оцінювання акустичної якості, використовуючи метод Беранека, і слугує надійним інструментом для дослідників, архітекторів, інженерів-акустиків під час проєктування або модернізації залів.

#### Рівень логіки підсистеми

Для автоматизації оцінювання акустики оперних та концертних залів необхідно знайти рівняння всіх графічних залежностей, за якими згідно з методом Беранека визначаєтсья кількість балів отримана для кожного параметра. Для вирішення цієї задачі запропоновано використати методи наближення функцій, а саме метод Ньютона [315]. Блок-схему алгоритму побудови математичної моделі методу Беранека представлено на рис. 7.22.



Рис. 7.22 Блок-схема алгоритму побудови математичної моделі методу

#### Беранека

#### Рівень інтерфейсу користувача

Під час програмної реалізації системи виявилося, що потрібно створити інтерфейс користувача з 12 слайдерами та 24 текстовими полями, що значно б збільшило код програми. Для збільшення швидкодії та зменшення коду програми запропоновано більшість елементів інтерфейсу реалізувати програмно використовуючи цикли. Блок-схема алгоритму створення елементів інтерфейсу представлена на слайді.



Рис. 7.23 Блок-схема алгоритму створення елементів інтерфейсу

На основі блок-схеми (рис. 7.23) створено програму, фрагмент якої представлено на рис. 7.24

1 😂 🔳	≱ ங 🖷 🤊 ୯   🍪 🌝 -   🚜 🗢 🕂   💌 - 🔂 🛣 🖷 🎕 🗊 🕮 🏭   Base ∨   fig.	
+	$1.0$ + $\div$ $1.1$ × $\parallel$ $\aleph$ $0$	
116 -	<pre>uicontrol('tag',strcat('edv',num2str(i)),</pre>	^
117	'position', [cx+1+80, cy-i*42, 50, h],	
118	'BackgroundColor', 'white',	-
119	<pre>'style','edit');</pre>	
120		
121 -	<pre>uicontrol('tag',strcat('txt',num2str(i)),</pre>	
122	'position', [cx, cy-i*42+16, 1-4, h],	
123	<pre>'string', eval(strcat('txt', num2str(i))),</pre>	
124	<pre>'style','text');</pre>	
125 -	if i<12	-
126 -	<pre>uicontrol('tag',strcat('sl',num2str(i)),</pre>	
127	<pre>'callback',eval(strcat('{@CBsl',num2str(i),'}')),</pre>	
128	'position', [cx, cy-i*42, 1, h],	
129	'value',a(i,1),	-
130	'Min', a(i,1), 'Max', a(i,2),	-
131	'style','Slider');	
132	<pre>% 'SliderStep', [1/(a(i,2)-a(i,1)) 5/1000],</pre>	
133	<pre>% eval(strcat('S',num2str(i))),</pre>	-
134 -	else	-
135 -	<pre>uicontrol('tag',strcat('sl',num2str(i)),</pre>	
136	'position', [cx, cy-i*42, 1, h],	
137	'FontSize',12,	
138	<pre>'style','edit');</pre>	
139 -	end	~
<		>
	Beranek / Beranek_OutputFcn Ln 100 Col 1	OVR

Рис. 7.24 Фрагмент програми для створення інтерфейсу підсистеми

У результаті запропонованих рішень спроєктовано та програмно реалізовано підсистему, інтерфейс якої представлено на рис. 7.25

承 Beranek				_	×
Automate houses	d evaluation of and concert ha	acoustic alls by Be	al quality eranek`s	of ope	ra I
Evaluate the suitable	ility of the premises for OPER.	A			
Evaluate the suitable	ility of the premises for ORKE	STRA			
Italian opera Intimate	(delay time of the first reflect	er`s opera ed sound) ITDG			
4			Þ	32.4627	34.4798
Liveness (	Reverberation time for freque	ency 500-1000 H	z)		
•			Þ	1.806	9.4925
Warmth (ratio of	reverberation time for frequer	ncies (125 + 250	/500 Hz)		
•			Þ	1.3372	17.931
	Loudness of the direct So	ound			
•			Þ	19.911	9.4712
Lou	dness of the reflected sound	LT/V* 1000			
•			Þ	59.4866	4.2486
Dif	fusion (irregularity of walls ar	nd ceilings)			
•			Þ	0.28955	-6.3301
В	alance and Blend (soloist - or	rchestra)			
4			►.	good	4.8179
Mutual unders	standing between singers or r	members of orch	estra		
4			►	middle	1.369
	Echo, noise and distortion of	fsound			
•			F	big	-8.2612
Th	e volume of direct sound on th	he balcony			
•				6.3582	6.3582
Use	eful reflections (delay is less t	than 35 ms)			
•			► E	7.0507	7.0507
	Hall Acoustic Rating			Kat.	Points
	Very good			Α	80.6

Рис. 7.25 Інтерфейс користувача

### 7.5. Висновки до розділу

Розроблено базу даних акустичних матеріалів, яка дала змогу автоматизувати процес добору відповідних матеріалів за їх властивостями, що значно збільшило ефективність роботи проєктантів та архітекторів. У базі передбачено автоматичну класифікацію та експорт вибраних матеріалів у MS Excel для подальшого опрацювання. Розроблено інформаційне, програмне та методичне забезпечення. Базу даних акустичних матеріалів можна використовуватися під час проєктуванні закритих і відкритих приміщень з акустичними властивостями. Спроєктовано таблиці бази даних та зв'язки між ними. Для збільшення ефективності та швидкодії автоматичну класифікацію вікон та дверей за класами звукоізоляційності реалізовано за допомогою запитів. Написано програми на Visual Basic для вибірки необхідних записів з бази даних та для управління віконними формами.

Розроблено інформаційну модель підсистеми, яка дала змогу автоматизувати процес проєктування звукоізоляції будівель. У системі передбачено автоматичні фільтри матеріалів, які дають змогу показувати користувачу тільки ті матеріали, які відповідають вимогам конструкції та будівельним нормам для даного типу будівлі та типу кімнати. У підсистемі передбачено автоматичний експорт сформованих проектів у MS WORD, що значно пришвидшило формування звітів та підготовку документації. Розроблено інформаційне, програмне та методичне забезпечення підсистеми добору ізоляції будівельних конструкцій.

Розроблено базу даних звукоізоляційних матеріалів із розбудованою системою фільтрів, яка дала змогу автоматизувати процес добору відповідних матеріалів, а запропоновані динамічні поля характеристик дали змогу значно зменшити розмірність бази даних та зробили її універсальним засобом, який дає змогу ввести нові типи матеріалів та передбачити для них будь-які 4 нові характеристики.

Проаналізовано метод Беранека для оцінки акустичної якості приміщень та запропоновано знайти рівняння графічних залежностей, що у свою чергу дало змогу програмно реалізувати даний метод. Під час розроблення використано динамічний інтерфейс, що зменшило код програми та збільшило швидкодію.

Розроблена підсистема значно спростила оцінювання акустичної якості оперних та концертних залів і таким чином може збільшити популярність цього методу. Розроблено математичне та програмне забезпечення підсистеми оцінювання акустичної якості приміщень методом Беранека.

# РОЗДІЛ 8 АПРОБАЦІЯ МЕТОДІВ АКУСТОМЕТРІЇ ЗАКРИТИХ ПРИМІЩЕНЬ

У заключному розділі продемонстровано практичне застосування розроблених методів. Зокрема, описано модель конвертера для автоматизованого експорту 3D-моделей із системи SketchUp y Catt-Acoustic [20, 42], а також результати експериментальних досліджень часу реверберації в сакральній споруді хрестоподібної форми [27], у Театрі імені Марії Заньковецької [30] та в лекційній аудиторії [16, 21]. Виконано порівняння теоретичних і виміряних параметрів, що підтвердило ефективність та практичну придатність запропонованих рішень [18, 29, 48].

Акустика приміщень вивчає, як звук поводиться всередині замкнутих просторів, таких як кімнати, зали та інші приміщення. Основні аспекти акустики приміщень включають у себе розсіювання звуку, його поглинання, відбиття та дифракцію. Вивчення цих аспектів допомагає створювати приміщення з бажаними акустичними характеристиками для різних застосувань, таких як концерти, театри, студії звукозапису та інші.

Основними чинниками, які впливають на акустику приміщення, є матеріали та геометрія приміщення. Наприклад правильний дизайн приміщення може мінімізувати небажані відбиття і стоячі хвилі. Також важливим є розміщення джерел звуку і приймачів. Оптимальне розташування гучномовців, музикантів та слухачів може значно покращити якість звуку. Використання акустичних елементів: панелі, дифузори, бас-пастки та інші елементи допомагають контролювати реверберацію та розподіл звуку.

Для оцінювання акустичної якості приміщень можна провести експерименти, наприклад використати імпульсний відгук приміщення для оцінки часу реверберації та інших параметрів або провести моделювання. На рис. 8.1 показано порівняльний аналіз методів оцінки акустичної якості приміщень їх переваги та недоліки. Якщо приміщення знаходиться на стадії проєктування, або його акустичні характеристики не відповідають вимогам до даного типу приміщення, то без моделювання не обійтися.

До основних систем, які використовуються для проєктування та аналізу акустичних характеристик приміщень належать:

- EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers);
- ODEON;
- CATT-Acoustic.



#### Рис. 8.1 Порівняльний аналіз методів оцінки акустичної якості приміщень

Система EASE є одним з найпопулярніших програмних пакетів для акустичного моделювання. Вона дає змогу створювати 3D-моделі приміщень, аналізувати розподіл звуку, розраховувати час реверберації, відбиття, поглинання і дифузію. Використовується для проєктування концертних залів, театрів, стадіонів, аудиторій.

Система ODEON використовує методи трасування променів для моделювання акустичних властивостей приміщень. Програма дає змогу оцінювати реверберацію, розподіл звукових хвиль, створювати анімації звукових полів. Використовується для проєктування архітектурних акустичних рішень, оцінка акустичних характеристик вже існуючих приміщень.

Система САТТ-Асоиstic використовує методи трасування променів та спеціальні алгоритми для моделювання акустичних параметрів приміщень [321, 322]. Програма підтримує аналіз реверберації, STI (Speech Transmission Index), створення анімацій та аудіо-візуалізацій. Використовується для проєктування концертних залів, аудиторій, офісних приміщень.

#### 8.1. Модель конвертера із системи SketchUP у систему Catt-Acoustic

Проведений аналіз даних систем дав змогу встановити, що побудова геометрії є складною і не існує універсальних конвертерів у зв'язку із чим поставлено задачу розробити модель конвертера. Для прикладу обрано систему САТТ-Acoustic. Оскільки у цій системі модель будується параметрично, спочатку координати, а потім за координатами площини, то під час моделювання складних об'єктів побудова моделі займає багато часу. У спробах знайти засіб проєктування 3D-моделей приміщень з метою їх подальшого експорту у систему Catt-Acoustic проаналізовано низку систем для 3D-моделювання та встановлено, що з простим та інтуїтивно-зрозумілим інтерфейсом можна вибрати систему SketchUP [323, 324]. Особливістю цієї системи є те, що у ній повністю відсутні вікна попередніх налаштувань. Всі геометричні характеристики під час дії інструменту або зразу після закінчення задаються з клавіатури, а спосіб опрацювання 3D-об'єктів всередині SketchUp відповідає системі Catt-Acoustic. Саме тому пропонується розробити конвертер, який має забезпечити можливість побудови складних моделей приміщень у системі SketchUP, після чого експортувати модель у вигляді параметричного файлу із координатами точок та площин, а також матеріалами у систему Catt-Acoustic для проведення акустичних моделювань.

#### Метод автоматизованого задання властивостей матеріалів

Для автоматизації процесу задання звукопоглинаючих та звукорозсіюючих властивостей матеріалів запропоновано метод, ідея якого полягає в автоматичному заданні акустичних властивостей матеріалів використаних у системі SketchUP під час експорту моделі до системи Catt-Acoustic.

Суть методу полягає в пошуку назв використаних матеріалів у системі SketchUP у базі матеріалів внесених у конвертер, та на підставі знайдених відповідностей генерування коду для системи Catt-Acoustic із вже встановленими коефіцієнтами звукопоглинання, розсіювання та кольору матеріалу.

В основі методу покладено ідею створення бібліотеки матеріалів та постійне її розширення, де назви матеріалів у бібліотеці матеріалів мають відповідати назвам, які передбачені у конвертері. Щоб реалізувати автоматичне задавання коефіцієнтів звукопоглинання матеріалів, необхідно у самому конвертері задати базу коефіцієнтів звукопоглинання часто вживаних матеріалів. Фрагмент програми на мові Ruby [324] для задання звукопоглинаючих властивостей матеріалів представлено на рис. 8.2.

🚡 Lister - [c:\Users\MMR\AppData\Roaming\SketchUp\SketchUp 2018\SketchUp\Plugins\SKP2CAT.r – 🛛	×	
Файл Правка Вид Кодировка Справка	75 %	
f<<"\n"		$\sim$
for i in 0mat.length-1		
F<< "ABS		
f< <mat[i][1(mat[i].length-2)].to s<="" td=""><td></td><td></td></mat[i][1(mat[i].length-2)].to>		
if matiil[1(matii].length-2)].to s == "mPlaster"		
f<<" <10 16 15 30 50 47> 1 <80 60 60 70 85 95> <166 255 159} "		
elsif mat[i][1(mat[i].length=2)].to s == "mWood"		
$f < 10 \ 10 \ 10 \ 5 \ 5 > L \ 20 \ 30 \ 35 \ 50 \ 50 \ 60 > \ 132 \ 72 \ 18 > 10$		
elsif mat[i][1(mat[i]]enoth=2)]_to s == "mTile"		
elsif mat[i][1] (mat[i]] enoth=2)[-to s == "mDruwall"		
$f(<)$ (29 16 5 $\mu$ 7 9)   <16 16 16 16 16 16 1/2 239 267 \		
elsif mat[i][1 (mat[i]]ength=2)] to s == "mGlass"		
f(<) (28 16 4 3 2 2)   (45 45 45 55 55 65) /7 201 240 "		
elsif mat[i][1(mat[i].length=2)]_to s == "mTextile"		
elsif mat[i][1(mat[i]]ength=2)]_to s == "mConcrete"		
elsif mat[i][1 (mat[i]]ength=2)] to s == "mMDE"		
f<<", <10, 10, 35, 72, 95, 905, 1, <30, 40, 50, 60, 65, 705, {224, 127, 305, "		
elsif mat[i][1(mat[i]]enoth=2)]_to s == "mMeta]"		
f < c'' <10 10 35 72 95 90 1 <30 40 50 60 65 70 2224 127 30 "		
elsif mat[i][1(mat[i]]ength=2)]_to s == "mParquet"		
 f<<" <10 10 10 10 10 10 >   <10 10 10 10 10 10 10 + colo[i]_red	.to	
" " + colo[i].green.to s + " " + colo[i].blue.to s + "} "		
end		
	>	Ξ.

Рис. 8.2 Код програми для задання звукопоглинаючих властивостей

Для створення нового матеріалу у системі SketchUP необхідно у головному вікні перейти на вкладку Materials та натиснути кнопку під номером 1, як це показано на рис. 8.3. Після чого відкриється вікно Create Materials у якому необхідно задати назву матеріалу (2), колір (3), а також

можна задати шлях до рисунку із текстурою. Задавши дані параметри зберігаєм новий матеріал (4).



Рис. 8.3 Створення нового матеріалу

Аналогічні кроки необхідно проробити для всіх інших матеріалів. Після того, як ми створили всі необхідні матеріали, які можуть використовуватися у цій чи інших моделях, необхідно зберегти їх. Для збереження з можливістю використання в інших моделях чи на інших комп'ютерах необхідно вибрати матеріал (див. рис. 8.4 (1)) клацнути на даному матеріалі праву кнопку миші та вибрати пункт Save As, після чого відкриється вікно переглядача в якому необхідно вказати шлях, де ми хочем зберегти матеріал, назву (2) та підтвердити збереження матеріалу (3).



Рис. 8.4 Збереження створеного матеріалу

Для автоматизації проведення акустичних моделювань розроблено бібліотеку часто вживаних матеріалів. Створення такої бібліотеки матеріалів із їх уніфікованими назвами дало змогу присвоєння відповідних коефіцієнтів звукопоглинання під час експорту моделі з системи SketchUP у систему Catt-Acoustic, що дає змогу зменшити затрати часу на прописування коефіцієнтів звукопоглинання матеріалів для октавних смуг частот.

#### Розроблення моделі конвертера із SketchUP у СИСТЕМУ Catt-Acoustic

Для зручного запуску конвертера написано код програми для його запуску через панель інструментів. Фрагмент програми для створення нової панелі інструментів «Catt-Acoustic» показано на рис. 8.5. Після включення цієї панелі інструментів можна швидко запустити конвертер використовуючи піктограму під номером (1), як на рис. 8.6.

<pre>toolbar = UI::Toolbar.new "Catt Acoustic" cmd = UI::Command.new("Catt Acoustic") { prompts = ["Nazua", "Odynyci"] defaults = ["MASTER", "Netry"] list = ["", "Metry[Diujny"] input = UI.inputbox(prompts, defaults, list, "Parametry exsportu.") model = Sketchup.active_model path_to_save_to = UI.savepanel("Save Image File", "c:\\", input[0]+".GEO") faces=[]</pre>
L1
cmd.small_icon = "Logo.png"
cmd.large_icon = "Logo.png"
cmd.tooltip = "Export to Catt Acoustic"
cmd.status_bar_text = "Export u Catt Acoustic"
cmd.menu_text = "Catt Acoustic"
toolbar = toolbar.add_item cmd
toolbar.show

Рис. 8.5 Код програми для створення піктограми запуску конвертера із



панелі інструментів

Рис. 8.6 Панель інструментів для запуску розробленого конвертера

На першому кроці розроблено модель конвертера, блок схему функціонування якого представлено на рис. 8.7.



Рис. 8.7 Блок-схема алгоритму роботи конвертера

У блок-схемі, передбачено перевірку чи задана назва матеріалу, якщо задана, то залишаємо ту саму назву, яка була в SketchUP, якщо ні, то згідно з алгоритмом задаємо назву "NoName".

Під час розроблення конвертера передбачено перевірку на помилки, а саме якщо хоча б одна із точок площини використовується, як точка іншої площини, то поверхня змодельована правильно. Це означає, що ця поверхня не є внутрішньою. Якщо жодна точка (координата) площини не використовується у іншій площині, то ця площина є внутрішньою поверхнею. Конвертер експортує таку модель у формат системи Catt-Acoustic, однак виведе застереження у вигляді діалогового вікна, яке міститиме повідомлення та координати точок поверхонь, які можуть викликати помилки у системі Catt-Acoustic. Після опрацювання алгоритмів та блок-схем на їх основі розроблено програму конвертера на мові Ruby [321].

#### Результати роботи конвертера

Результатом застосування конвертера є створений програмний файл геометрії, який представлено на рис. 8.8.

<pre>File Edit Search Character Templat Help ABS NoName &lt;10 10 10 10 10 10 &gt; L &lt;10 10 10 10 10 10 &gt; L &lt;252 255 255) ABS mQuartz Light Grey &lt;10 10 10 10 10 10 &gt; L &lt;10 10 10 10 10 10 10 (251 251 251 252) ABS malumium &lt;10 10 10 10 10 10 &gt; L &lt;10 10 10 10 10 10 10 10 (179 179 179) ABS mTranslucent Glass Blue &lt;10 10 10 10 10 10 &gt; L &lt;10 10 10 10 10 10 10 10 10 (100 149 237 CORNERS 1 5.034 0.0 2.975 2 5.034 6.0 2.975000000000005 3 0.0 6.0 2.975000000000005 4 0.0 0.0 2.975 5 0.0 0.0 0.0 6 5.034 0.0 0.0 7 0.0 0.0 2.7 9 -0.4 0.0 2.7 9 -0.4 0.0 0.7 10 5.034 11.77 0.0 12 5.034 11.77 0.7 15 5.034 6.42000000000001 2.97500000000005 14 5.034 6.42000000000001 2.975000000000005 15 5.334 10.33 0.0 20 5.434 10.33 0.0 20 5.434 10.33 0.0 21 5.434 0.03 2.08 22 5.434 8.69 2.08 33 5.434 8.69 0.0 23 5.434 8.69 0.0 24 0.0 11.77 0.7 25 0.0 6.42000000000001 0.7 26 0.0 6.42000000000001 2.7 27 -0.4 6.42000000000001 2.7 27 -0.4 6.42000000000001 2.7 28 -0.4 6.42000000000000000000000000000000000000</pre>	*CATT-Edit - MASTER
ABS NOName <10 10 10 10 10 10 > L <10 10 10 10 10 > [255 255] ABS mQuartz Light Grey <10 10 10 10 10 > L <10 10 10 10 10 10 10 10 [251 251 252] ABS mIluminum <10 10 10 10 10 10 > L <10 10 10 10 10 10 [179 179] ABS mTranslucent Glass Blue <10 10 10 10 10 10 > L <10 10 10 10 10 10 10 10 10 [149 237 CORNERS 1 5.034 0.0 2.975 2 5.034 6.0 2.97500000000005 3 0.0 6.0 2.97500000000005 4 0.0 0.0 2.975 5 0.0 0.0 0.0 5 0.0 0.0 0.7 9 -0.4 0.0 2.7 9 -0.4 0.0 0.7 10 5.034 0.0 2.7 1 5.034 6.12.7 9 -0.4 0.0 0.7 1 5.034 11.77 0.0 1 2 5.034 11.77 0.7 1 5 5.034 6.42000000000001 2.97500000000005 14 5.034 6.420000000000001 2.7 15 5.034 6.0 2.7 15 5.034 8.89 2.08 18 5.034 10.33 0.0 20 5.434 10.33 0.0 21 5.434 8.89 0.0 22 5.434 8.89 0.0 23 5.434 8.89 0.0 24 0.0 11.77 0.7 25 0.0 6.42000000000001 2.7 27 -0.4 6.42000000000001 2.7 27 -0.4 6.420000000000000 0.7 20 0.64200000000000000000000000000000000000	File Edit Search Character Template Help
CORNERS  1 5.034 0.0 2.975 2 5.034 6.0 2.97500000000005 3 0.0 6.0 2.97500000000005 4 0.0 0.2 .97500000000005 4 0.0 0.2 .975 5 0.0 0.0 0.0 6 5.034 0.0 0.0 7 0.0 0.2 .7 9 -0.4 0.0 2.7 9 -0.4 0.0 2.7 9 -0.4 0.0 0.7 10 5.034 11.77 0.0 12 5.034 11.77 0.0 12 5.034 11.77 0.7 13 5.034 6.4200000000001 2.97500000000005 14 5.034 6.0 2.7 15 5.034 6.0 2.7 16 5.034 6.0 2.7 16 5.034 6.89 0.0 17 5.034 6.89 0.0 18 5.034 10.33 2.08 18 5.034 10.33 2.08 19 5.034 10.33 0.0 20 5.434 10.33 0.0 21 5.434 10.33 2.08 23 5.434 8.69 2.08 23 5.434 8.69 0.0 24 0.0 11.77 0.7 25 0.0 6.420000000001 0.7 26 0.0 6.4200000000001 2.7 27 -0.4 6.4200000000001 2.7 27 -0.4 6.42000000000001 2.7 27 -0.4 6.42000000000001 2.7 29 0.0 11.77 2.7 30 -0.4 1.77 2.7	ABS NoName <10 10 10 10 10 10 > L <10 10 10 10 10 10 <{255 255 255} ABS mQuartz Light Grey <10 10 10 10 10 0 > L <10 10 10 10 10 10 >{251 251 251 252} ABS mAluminum <10 10 10 10 10 10 > L <10 10 10 10 10 10 >{179 179 179} ABS mTranslucent Glass Blue <10 10 10 10 10 10 10 > L <10 10 10 10 10 10 10 >{100 149 237}
$\begin{array}{l} 1 \ 5.034 \ 0.0 \ 2.975 \\ 2 \ 5.034 \ 6.0 \ 2.97500000000005 \\ 3 \ 0.0 \ 6.0 \ 2.97500000000005 \\ 4 \ 0.0 \ 0.0 \ 2.975 \\ 5 \ 0.0 \ 0.0 \ 0.0 \\ 6 \ 5.034 \ 0.0 \ 0.0 \\ 7 \ 0.0 \ 0.0 \ 2.7 \\ 8 \ -0.4 \ 0.0 \ 2.7 \\ 9 \ -0.4 \ 0.0 \ 0.7 \\ 10 \ 0.0 \ 0.0 \ 0.7 \\ 10 \ 0.0 \ 0.0 \ 0.7 \\ 11 \ 5.034 \ 11.77 \ 0.7 \\ 12 \ 5.034 \ 11.77 \ 0.7 \\ 12 \ 5.034 \ 6.42000000000001 \ 2.975000000000005 \\ 13 \ 5.034 \ 6.420000000000001 \ 2.975000000000005 \\ 14 \ 5.034 \ 6.42000000000000001 \ 2.7 \\ 15 \ 5.034 \ 6.0 \ 2.7 \\ 15 \ 5.034 \ 6.0 \ 2.7 \\ 15 \ 5.034 \ 6.89 \ 2.08 \\ 18 \ 5.034 \ 10.33 \ 0.0 \\ 22 \ 5.434 \ 10.33 \ 0.0 \\ 23 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 23 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 23 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 23 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 23 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 23 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 23 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 23 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 23 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 23 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 23 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 23 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 24 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.434 \ 8.89 \ 2.08 \\ 25 \ 5.42000000000000000000000000000000000000$	CORNERS
	$\begin{array}{l} 1 5.034 \ 0.0 \ 2.975 \\ 2 \ 5.034 \ 6.0 \ 2.97500000000005 \\ 3 \ 0.0 \ 6.0 \ 2.97500000000005 \\ 4 \ 0.0 \ 0.0 \ 2.975 \\ 5 \ 0.0 \ 0.0 \ 0.0 \\ 6 \ 5.034 \ 0.0 \ 0.0 \\ 7 \ 0.0 \ 0.0 \ 2.7 \\ 8 \ -0.4 \ 0.0 \ 0.7 \\ 10 \ 0.0 \ 0.0 \ 0.7 \\ 10 \ 0.0 \ 0.0 \ 0.7 \\ 11 \ 5.034 \ 11.77 \ 0.0 \\ 12 \ 5.034 \ 11.77 \ 2.975 \\ 13 \ 5.034 \ 6.42000000000001 \ 2.97500000000005 \\ 14 \ 5.034 \ 6.420000000000001 \ 2.7 \\ 15 \ 5.034 \ 6.420000000000001 \ 2.7 \\ 15 \ 5.034 \ 6.4200 \\ 15 \ 5.034 \ 6.9 \ 2.08 \\ 10 \ 5.034 \ 10.33 \ 2.08 \\ 19 \ 5.034 \ 10.33 \ 2.08 \\ 19 \ 5.034 \ 10.33 \ 2.08 \\ 19 \ 5.034 \ 10.33 \ 2.08 \\ 23 \ 5.434 \ 8.69 \ 2.0 \\ 23 \ 5.434 \ 8.69 \ 2.0 \\ 23 \ 5.434 \ 8.69 \ 2.0 \\ 23 \ 5.434 \ 8.69 \ 0.0 \\ 24 \ 0.0 \ 11.77 \ 0.7 \\ 26 \ 0.0 \ 6.4200000000001 \ 2.7 \\ 27 \ -0.4 \ 6.42000000000001 \ 2.7 \\ 28 \ -0.4 \ 6.42000000000001 \ 2.7 \\ 28 \ -0.4 \ 6.420000000000001 \ 2.7 \\ 28 \ -0.4 \ 6.420000000000001 \ 2.7 \\ 29 \ -0.4 \ 1.77 \ 2.7 \\ 30 \ -0.4 \ 11.77 \ 2.7 \\ 31 \ 0.0 \ 11.77 \ 2.7 \\ 31 \ 0.0 \ 11.77 \ 2.7 \\ 31 \ 0.0 \ 11.77 \ 2.7 \\ 31 \ 0.0 \ 11.77 \ 2.7 \\ 31 \ 0.0 \ 11.77 \ 2.7 \\ 31 \ 0.0 \ 11.77 \ 0.7 \\ \end{array}$

Рис. 8.8 Код програми в Catt-Acoustic отриманий з використанням

розробленого конвертера
Запустивши у системі Catt-Acoustic файл (рис. 8.8) результатом буде модель, як на рис. 8.9, яка показує правильність роботи запропонованого методу, який реалізований у конвертері. Тепер можна перевірити метод на прикладі лекційної аудиторії.



Рис. 8.9 Геометрія лекційної аудиторії у системі Catt-Acoustic



Рис. 8.10 Перевірка правильності задання коефіцієнтів поглинання

Знаючи якому матеріалу який колір відповідає, можна перевірити, чи правильно задали матеріал відповідним поверхням і відповідно коефіцієнти звукопоглинання.



Рис. 8.11 Перевірка правильності повернення поверхонь

Як бачимо з результатів на рис. 8.11 поверхні відображаються правильно і матеріали теж задані вірно, отже розроблений конвертер і метод автоматизованого задання коефіцієнтів звукопоглинання матеріалів працюють правильно.

### Тестування конвертера

Для проведення тестування розробленого конвертера розроблено складнішу модель у системі SketchUP, яку у системі можна побудувати дуже швидко, натомість для написання програми у системі Catt-Acoustic для такої моделі піде у декілька разів більше часу. Тестову модель у системі SketchUP представлено на рис. 8.12. Використавши розроблений конвертер миттєво отримаєм код програми для системи Catt-Acoustic, який представлений на рис. 8.13.



Рис. 8.12 Тестова модель у системі SketchUP

CATT-Edit - Master
File Edit Search Character Template Help
;Fail stvorenyj z vykorystnniam konvertera
ABS BezTmeni <10 10 10 10 10 10 > T <10 10 10 10 10 10 10 255 255 255
CORNERS
1 -0.04073206904074019 7.328764193918328 0.0
2 4.47126793095926 7.328764193918328 0.0
3 4.47126793095926 0.4697641939183282 0.0
4 1.1829954834946672 0.4697641939183282 0.0
5 1.1029954034946672 0.4697641939103202 3.2170951726909370
5 -0.04073206904074019 7.328764193918328 2.349978716324036
7 2.308656644396753 1.014764193918329 1.1974586950977388
3 3.1086566443967527 1.014764193918329 1.1974586950977388
3.1086566443967527 1.014764193918329 1.7744586950977388
0 2.308656644396753 1.014764193918329 1.7744586950977388
1 2.001656644396753 0.4697641939183282 1.1974586950977388
2 3.5866566443967534 0.4697641939183282 1.1974586950977388
13 3.5866566443967534 0.4697641939183282 2.540458695097739
4 2.001656644396753 0.4697641939183282 2.540458695097739
5 4.47126793095926 0.8502756945606021 1.7888165020893418
16 4.47126793095926 0.8502756945606021 0.6458165020893418
17 5.263267930959259 0.8502756945606021 0.6458165020893418
18 5-263267930959259 0.8502756945606021 1.7888165020893418
19 4.8522679309592585 2.5316149317491887 2.094519748591628
20 4.47126793095926 2.5316149317491887 2.094519748591628
21 4.8522679309592585 5.203275694560602 0.6458165020893418
22 4.47126793095926 5.203275694560602 0.6458165020893418
23 3.761267930959259 7.328764193918328 2.349978716324036
24 3.761267930959259 0.4697641939183282 3.2178951726989378

Рис. 8.13 Синтезована з допомогою розробленого конвертера програма

Запустивши код програми (рис. 8.13) у системі Catt-Acoustic отримаємо точну копію створеної у системі SketchUP моделі, на якій вже можна проводити акустичні дослідження.



Рис. 8.14 Тестова модель у системі Catt-Acoustic після конвертування

Отже, розроблений на основі запропонованого методу конвертер працює навіть на складних геометричних моделях приміщень і може використовуватися для конвертування будь-яких моделей приміщень із системи SketchUp у систему Catt-Acoustic.

# 8.2. Метод автоматизованого добору коефіцієнтів звукопоглинання для калібрування моделей

Якщо мова іде про акустичну якість приміщення, то одним із важливих параметрів, який її характеризує є час реверберації [47, 339]. Цей параметр часто використовують для калібрування моделі. Так, наприклад якщо потрібно створити модель приміщення для дослідження його акустичних характеристик або їх удосконалення, то одним із способів отримати точну модель є відповідний добір коефіцієнтів звукопоглинання матеріалів стін, стелі, підлоги, оздоблення та ін. У системі САТТ-Асоиstic і системах аналогах відсутні модулі оптимізації, які б дали змогу автоматично підібрати відповідні матеріали, у в'язку з чим поставлено задачу знайти спосіб швидкого добору відповідних коефіцієнтів звукопоглинання матеріалів. Для того, щоб модель доброю ïï необхідно відкалібрувати відповідно вважалася до експериментально визначеного часу реверберації. Різниця між моделюю і експериментом не може бути більшою 5%. У зв'язку із чим добір коефіцієнтів інколи може займати багато часу.

### Розроблення методу автоматизованого добору коефіцієнтів звукопоглинання

Для того, щоб дослідити ефективність роботи методу вибрано синагогу «Цорі Ґільод», яка заходиться у м. Львів. Фото синагоги представлено на рис. 8.15. Приміщення займає площу 230 м<sup>2</sup> з об'ємом 2465 м<sup>3</sup>. Висота стелі становить 14 м.



Рис. 8.15 Фотографія синагоги «Цорі Гільод», м. Львів

Проведено експериментальне вимірювання часу реверберації (рис. 8.16). Для перевірки моделі взято результати часу реверберації отримані під балконом, оскільки там найбільше скарг на погану зрозумілість проповіді. пропонується використати для Отримані дані калібрування моделі спроектованої системі Catt-Acoustic отриманої з y використанням розробленого конвертера, як показано на рис. 8.17.



Рис. 8.16 Реєстрація імпульсного відгуку приміщення



Рис. 8.17 Модель синагоги у системі Catt-Acoustic

Результати експериментального визначення часу реверберації, та моделювання зіставлено у табл. 8.1.

Таблиця 8.1

Метод	Час реверберації, секунд на частоті, Гц							
	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Експеримент	3,01	3,13	3,56	3,54	3,18	2,41	1,48	
T-30	3,3	3,17	3,58	3,78	3,26	2,65	1,23	
Eyring	2,84	3,01	3,43	3,58	3,05	2,5	1,2	
Sabine	2,96	3,12	3,54	3,67	3,13	2,54	1,21	

Час реверберації в октавних смугах частот

Як бачимо із таблиці 8.1 результати за формулами Ейрінга [340], Сабіна [341], моделювання T30 та експериментальні подібні. Сума похибок експериментальних даних відносно моделі становить 4,8%, отже модель можна ефективно використовувати. Аналізуючи експериментальні дані часу реверберації та беручи до уваги, що вагомим критерієм є зрозумілість мови, постає задача знизити середній час реверберації до 1,75 с. Зазвичай така задача зводилась до того, що проектант брав каталог із властивостями матеріалів та проводив серію моделювань добираючи відповідний матеріал.

Пропонуємо задачу синтезу, тобто навпаки розрахувати, які мають бути коефіцієнти затухання матеріалу, щоб отримати бажаний час реверберації, а вже тоді підбирати матеріал, який відповідає заданим критеріям коефіцієнтів поглинання. Для автоматизації цього процесу запропоновано новий метод, основні кроки якого представлено на рис. 8.18.



Рис. 8.18 Метод добору коефіцієнтів поглинання

Час реверберації Т можна визначити із формули Сабіна [342]:

$$T = \frac{0.161V}{A} = \frac{0.161V}{\sum_{i=1}^{n} a_i S_i}$$
(8.11)

де: V - об'єм приміщення,  $S_i$  – площа *i* -ї поверхні,  $\alpha_i$  – коефіцієнт поглинання *i* -ї поверхні. Використовуючи цю залежність можна визначити, яка частка об'єму припадає на одну поверхню. Під час досліджень встановлено, що найкраще частку об'єму відобразити через відсоткову частку однієї поверхні відносно всього об'єму, звідси отримаєм:

$$\alpha = \frac{0.161 \cdot V_S \cdot p_S}{T \cdot S} \tag{8.22}$$

де  $p_s$  - відсоткова частка поверхні, коефіцієнти поглинання якої добираються;  $\alpha$  – шуканий коефіцієнт поглинання, Vs – об'єм приміщення,  $p_s$  – відсоткова частка поверхні коефіцієнт поглинання якої необхідно визначити, T – бажаний час реверберації, S-площа поверхні до якої добирається коефіцієнт поглинання. Інформація про площу поверхонь та їх процентну частку відносно всіх поверхонь отримано з програми CATT-Acoustic, подано у таблиці 8.2.

### Таблиця 8.2

Площа, [м<sup>2</sup>] Площа [%] Назва площини **FLOOR** 58 955,2 355,5 **MTILE** 21,6 **MDRYWALL** 159,6 9,7 **MWOODL** 74,6 4.5 **MWOOD** 52,8 3,2 **MGLASS** 2,2 35,7 MTEXTILE 13,4 0,8 1646,9 100 Разом

Площа поверхонь та їх процентна частка відносно всіх поверхонь отримана

Оскільки на об'єм приміщення не мають впливу лавки, столи і т.д., у зв'язку із чим під час розрахунку  $p_s$  їх не потрібно враховувати. Звідси таблиця 8.2 набуде вигляду:

із програми CATT-Acoustic

332

Назва площини	Площа, [м2]	Площа, [%]
FLOOR	955,2	61,3
MTILE	355,5	22,8
MDRYWALL	159,6	10,2
MWOODL	-	0,0
MWOOD	52,8	3,4
MGLASS	35,7	2,3
MTEXTILE	-	0,0
	1558,8	100,0

Площа поверхонь та їх процентна частку відносно всіх поверхонь

Таблиця 8.2 відображає статистичні дані із програми Catt-Acoustic, натомість таблиця 8.3 відображає вже видалені поверхні, які не мають впливу на об'єм приміщення, після чого заново перерахована відсоткова частка кожної поверхні. Як бачим із табл. 8.3 найбільшу частку площі має підлога і за невеликої зміни коефіцієнту поглинання можна отримати наближені до рекомендованих значення часу реверберації.

Так само цей метод можна застосовувати, коли нам відомо, які параметри часу реверберації хочем отримати, але не знаємо, який матеріал застосувати.

Таблиця 8.4

Метод		Частота, [Гц]								
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k		
α, [%]	6,16	8,86	7,9	6,94	6,723	4,1878				
Eyring	2,84	3,01	3,43	3,58	3,05	2,5	1,2	0,41		
Sabine	2,96	3,12	3,54	3,67	3,13	2,54	1,21	0,41		
T-30	3,3	3,17	3,58	3,78	3,26	2,65	1,23	0,412		

Фактичний час реверберації

Для того, щоб отримати проєктований час реверберації як у таблиці 8.5, розраховуємо з використанням розробленого методу, які коефіцієнти поглинання має мати матеріал, щоб отримати такий час реверберації. Розраховані коефіцієнти теж представлені у таблиці 8.5.

Таблиця 8.5

Результат із розрахованими за запропонованою методикою коефіцієнтами

Метод		Частота, [Гц]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k	
α, [%]	12,97	13,66	14,41	15,26	16,22	17,30		
Проектований час	2,00	1,90	1,80	1,70	1,60	1,50		
реверберації								
Eyring	1,87	2,18	2,16	2	1,73	1,34	0,79	
Sabine	1,99	2,3	2,28	2,11	1,82	1,41	0,81	
T-30	2,1	2,29	2,25	2,1	1,83	1,41	0,81	

#### поглинання

Звісно знайти матеріал із точно такими коефіцієнтами поглинання складно, але із наближеними ми знаходимо покриття ковролін товщиною 2,4 мм який має наближені коефіцієнти поглинання до розрахованих за допомогою запропонованого методу.

### Таблиця 8.6

#### Метод Частота, [Гц] 8k 125 250 500 1k 2k 4k 16k 17,30 12,97 α, [%] Розрахунок 13,66 14,41 15,26 16,22 α, [%] Ковролін 10 16 15 47 30 50 Eyring 0,604 0,488 0,279 2,21 1,91 2,09 1,09 0,617 0,294 Sabine 2,33 2,03 2,2 0,735 0,702 0,541 1,21 T-30 2,5 2,01 2,17 1,15 0,644 0,636 0,509 0,289

Результат із розрахованими за запропонованою методикою коефіцієнтами

Для частот 8 і 16 кГц дані апроксимуються, оскільки на високих частотах більший вплив має затухання у повітрі ніж коефіцієнт поглинання. Елементи, що містяться у приміщенні синагоги, мають такі коефіцієнти поглинання (табл. 8.7).

#### поглинання

Таблиця 8.7

Частота (Гц)	125	250	500	1000	2000	4000
Дерев'яні поверхні	10	10	10	5	5	5
Штукатурка	13	13,65	14,4	15,3	16,2	17,3
Лавки	10	10	10	5	5	5
Керамічна плитка	1	1	1	2	2	2
Гіпсокартон	29	10	5	4	7	9
Вікна	28	16	4	3	2	2
Оббивка крісел	10	10	35	72	95	90

Коефіцієнти поглинання елементів приміщення у %

### Перевірка правильності роботи методу

Необхідно пам'ятати, щоб скоригована характеристика поглинання відповідала фізичним властивостям матеріалу (наприклад, гіпсокартонну стіну необхідно трактувати як матеріал, який має більший коефіцієнт поглинання, ніж сама гіпсокартонна плита, бо ще має простір між плитою і стіною, а інколи і мінеральну вату). Експериментальні вимірювання часу реверберації будуть проводитись скоріш за все без людей, тому коефіцієнти поглинання для поверхонь, які моделюють поверхні, де знаходяться люди мають мати відповідні значення.

Під час побудови моделі варто використовувати файл із статистикою матеріалів, згенерований з допомогою інструменту Interactive RT estimate.

Велике значення має поглинання поверхонь, які знаходяться навпроти сцени. Варто звернути увагу на великі поверхні, наприклад підлогу і стелю.



Рис. 8.19 Результати часу реверберації для різних варіантів моделювання

Як вийшло із моделювань і видно із графіку (рис. 8.19), за такого облаштування синагоги, як вона зараз є, час реверберації є більшим 3 секунд, що погано впливає на зрозумілість мови. Для зрозумілості мови найкориснішим часом реверберації є 0,6-1,6 с, для такого об'єму тяжко добитися такого малого часу, бо застосувавши матеріали із великим коефіцієнтом поглинання одночасно втратимо на силі звуку, яка буде різко спадати під час віддалення від джерела, тобто від рабина, який веде проповідь. Оскільки у синагогах в основному відбуваються проповіді, то зрозумілість мови є найважливішою.

На графіку червоною кривою зазначено час, який ми б хотіли отримати, підібравши відповідні коефіцієнти поглинання.

Використавши запропоновану методику підбору коефіцієнтів поглинання ми за одну ітерацію підібрали відповідні коефіцієнти поглинання для матеріалу покриття підлоги. Порівнюючи фіолетову криву із червоною, бачимо що результати розбігаються не більше ніж 0,5 с. Підібравши матеріал із наближеними характеристиками звукопоглинання отримали час реверберації із реальним матеріалом — це зелена крива, яка показує час реверберації під час модифікації приміщення з застосуванням підлогового покриття ковролін. Оскільки важко знайти матеріал із конкретними заданими параметрами, ми добрали подібний, коефіцієнти поглинання якого у низьких і середніх частотах дали приблизно очікувану вартість часу реверберації, натомість у високих частотах застосування даного матеріалу у ефекті дало набагато нижчий час реверберації, що є навіть краще для зрозумілості мови.

# 8.3. Експериментальне дослідження часу реверберації сакрального об'єкта у формі хреста

Уже багато років одним з основних акустичних параметрів, які використовуються для оцінки акустичної якості сакральних інтер'єрів є час реверберації [325, 326]. Розраховане або виміряне значення часу реверберації можна порівняти із рекомендованими для даного типу приміщення значеннями і таким чином оцінити чи буде достатня зрозумілість мови та гучність на всіх місцях де можуть знаходитись віряни [327]. Час реверберації все ще є основним і найчастіше використовуваним фактором, що визначає акустичні властивості сакрального інтер'єру, через те, що до цього часу не існує єдиного методу оцінки акустики цього типу інтер'єру, а також тому, що це внутрішній параметр, який може бути розрахований на стадії проєктування, а потім перевірений експериментально [27].

Оцінка на основі порівняння вимірюваного часу реверберації до рекомендованого не повністю відображає акустичні якості приміщення, що є інтер'єром сакрального об'єкта, призначеного для виконання багатьох функцій з точки зору акустики. Однак даний параметр дає змогу провести вступну оцінку здатності оцінюваного приміщення виконувати свою функцію з точки зору акустики [328].

Саме тому поставлена задача дослідити акустичні властивості церкви св. Івана Хрестителя, що знаходиться у с. Верхня Калуського району, Івано-Франківської області (див. рис. 8.20).



Рис. 8.20 Фото досліджуваного об'єкту

Для цього необхідно провести вимірювання геометричних розмірів споруди із зазначенням матеріалів. На наступному кроці необхідно провести експериментальне дослідження часу реверберації з метою дослідження рівномірності поширення звукової енергії у досліджуваному приміщенні. Джерело імпульсного шуму необхідно встановити на місці де зазвичай священник править службу, а другий варіант встановлення джерела це там де знаходиться хор.

### Побудова 3Д-моделі церкви

У літературі рекомендований час реверберації дуже часто має прив'язку до об'єму приміщення [328]. Саме тому, для визначення рекомендованого часу реверберації, необхідно знати об'єм приміщення. Для точного визначення об'єму приміщення запропоновано розробити 3D-модель у системі SketchUP. Розроблена модель дала змогу точно визначити об'єм а також може бути використана для побудови акустичної моделі церкви при експорті до систем моделювання акустики приміщень, таких як наприклад CattAcoustic [42], з метою подальшої акустичної адаптації приміщення церкви. Також модель можна використати для тестування точності систем моделювання акустики, але при цьому необхідно точно задати коефіцієнти поглинання використаних при оздобленні церкви матеріалів. Найчастіше модель має розбіжності із експериментальними даними через невідповідне задання коефіцієнтів звукопоглинання матеріалів.

На початковому етапі пропонувалося розробити модель по кресленнях (див. рис. 8.21), однак перевірка показала, що фактичні розміри не завжди відповідають кресленню, тому за допомогою лазерного далекоміра знято фактичні розміри.



Рис. 8.21 Креслення церкви (вигляд збоку)

По фактичних розмірах спроектована 3D-модель церкви, яка представлена на рис. 8.22. Церква виготовлена із цегли, та займає площу 397 м<sup>2</sup> з об'ємом 4070 м<sup>3</sup>. Висота куполу становить 22,5 м.



Рис. 8.22 3D-модель церкви

### Опис умов вимірювання

Сигналом випробування був імпульсний шум. В якості джерела імпульсного шуму використано повітряні кульки, які цілком задовольняють вимоги до імпульсних джерел шуму. Джерело імпульсного шуму встановлювалось на висоті 1,5 [м] та 1,2 [м] від підлоги [329]. Для запису відгуку приміщення використано ємнісний, всенаправлений вимірювальний мікрофон SV22, встановлений на висоті 1,2 [м], та шумомір аналізатор спектру SVAN 958A. Перед початком проведення експерименту провдено калібрування обладнання. Всі експерименти проводились при температурі 19°С та відносній вологості 49%. Записані сигнали оброблялися за допомогою алгоритму, реалізованого в Dirac 5.0. Як наслідок його роботи отримано час реверберації визначений в октавних діапазонах від 125 до 8000 [Гц]. Фото проведення експерименту представлено на рис. 8.23.



Рис. 8.23 Вимірювання часу реверберації

## Порівняння результатів експерименту з рекомендованими значеннями параметрів

Для порівняння значень акустичних параметрів, отриманих в результаті експерименту, з рекомендованими значеннями, були визначені середні показники Т30 для 500 і 1000 [Гц] (див. 8.8).

Таблиця 8.8

Частота	500 Гц	1000 Гц
Кількість	11	11
експериментів		
Мінімум	4,007	3,741
Максимум	4,244	4,029
Середнє значення	4,142	3,91
Рекомендоване	3,54	3,54
значення		

Статистичні результати ТЗО для 500 та 1000 Гц.

Рекомендоване значення часу реверберації для католицьких церков відповідно до Kulowskiego [77] з кубатурою 4070 м3 позначеним як усереднений час із графічних співвідношень T(V) становить 1,82с. Як бачимо, церква не відповідає вимогам, але важко чітко оцінити це через велику невідповідність рекомендованого часу реверберації для церков. Діапазон допуску становить ± 20%, за винятком частоти 125 [Гц] (50% допуску вгору) та 4000 [Гц] (40% допуску вниз).

Для того, щоб дослідити як змінюється час реверберації в залежності від точки спостереження, а також біля стін, посередині та на балконі вибрано декілька вимірювальних пунктів. Схема розміщення пунктів у яких велися вимірювання представлена на рис. 8.24.



Рис. 8.24 Схема розміщення вимірювальних пунктів

На графіку як на рис. 8.25 представлені результати визначення часу реверберації для 11 різних пунктів розміщення джерела шуму і шумоміра. Перший пункт відкинутий, він був тестовий. Як бачимо з графіку дуже хороша повторюваність результатів. Тільки на низьких частотах пункт 3 відбігає від всіх інших, це пов'язано з тим, що він знаходився майже під балконом і тут додалася ще запізніла звукова енергія яка дійшла із під балкону, оскільки саме високі частоти погано загасають у повітрі.



Рис. 8.25 Результати визначення часу реверберації для 11 різних пунктів розміщення джерела шуму і шумоміра.

Як згадувалось раніше для об'єму приміщення церкви 4070 метрів кубічних рекомендований час реверберації має становити 1.82 с, а в нашому випадку середнє значення для 500 та 1000 Гц складають відповідно 4,1 секунду та 3.9 секунд, однак по-перше вимірювання проводились без людей, бо карантин, а по-друге вони б створювали додатковий шум. Якщо врахувати поверхню поглинання людей і килимове покриття, які забрали із підлоги теж у зв'язку із карантином, то можна припустити, що акустика даної церкви є непоганою, однак для підтвердження необхідно провести додаткові моделювання, а дані результати використати для калібрування моделі.

Проведені дослідження часу реверберації церкви дали змогу встановити, що проблемою сакральних об'єктів є їх великий об'єм, який у свою чергу призводить до збільшення часу реверберації. Але оскільки у церквах велику частину часу співає хор, то це є корисним, однак коли ведеться промова священником, то розбірливість мови є поганою, що ми нераз могли зауважувати. Експерименти показали, що розподіл по приміщенню часу реверберації є рівномірним, однак він є завеликий і якість передачі мови у зв'язку з цим є низькою.

# 8.4. Аналіз акустичних параметрів Театру імені Марії Заньковецької у Львові до та після модернізації

Національний академічний український драматичний театр ім. Марії Заньковецької у Львові побудований між 1837 і 1842 роками за проектами Людвіга Піхла та Йоганни Зальцман. Архітектурне планування театру розроблено без компромісів, що зробило його найбільшим театральним об'єктом у Європі. Від початку свого існування театр був центром культурного життя Східної Галичини. У початковій формі було близько 1460 місць для глядачів, розподілених на партері, бічних ложах і чотирьох балконах. У 1941-1944 роках у зв'язку з будівельними пошкодженнями пальового фундаменту об'єкт частково перебудували. Початкові балкони та бічні ложі замінили двома амфітеатральними балконами.

Дослідження Беранека [330] щодо звукопоглинання аудиторією у великих залах вказує на лінійну залежність між еквівалентною площею звукопоглинання та поверхнею аудиторії. Проте звукопоглинання аудиторії визначається багатьма характеристиками, такими як конструкція сидінь, щільність розташування, профіль аудиторії та розташування секторів. Відповідно до Нісіхара [331] і Куловскького [332] аудиторія є основним фактором, що визначає еквівалентну площу звукопоглинання концертного залу з внеском до 80%. Він визначає ревербераційні умови інтер'єру. Тому вкрай важливо оцінити коефіцієнт звукопоглинання аудиторії з максимальною точністю.

Метою даного дослідження є вивчення впливу параметрів аудиторії та сцени на акустичні параметри театрального залу. Аналіз проводився для трьох

різних варіантів оббивки сидінь – легкої, середньої та товстої. Для залу проведено аналіз загального звукопоглинання. Спостережувані параметри включали час реверберації T20, індекс чіткості C80 та індекс передачі мови STI.

### Дослідження акустичних параметрів театру

Театр розрахований на 799 глядачів, 531 на партері та 268 на двох балконах. Основний об'єм залу (близько 5400 м<sup>3</sup>) з'єднаний із сценою об'ємом 8000 м<sup>3</sup>. Детальні параметри театрального залу наведені в 8.9, а плани першого та другого поверхів на рис. 8.26 та рис. 8.27.

### Таблиця 8.9

N⁰	Параметр	Значення
1	Загальний об'єм V [м <sup>3</sup> ]	13400
2	Об'єм зали V <sub>w</sub> [м <sup>3</sup> ]	5400
3	Об'єм сцени V <sub>sc</sub> [м <sup>3</sup> ]	8000
4	Об'єм оркестрової ями V або [м <sup>3</sup> ]	80
5	Поверхня сцени S <sub>sc</sub>	410
6	Поверхня оркестрової ями S <sub>or</sub>	40
7	Кількість об'єднаних місць N	799
8	Кількість місць на першому поверсі N <sub>c</sub>	531
9	Кількість місць у ложах N <sub>л</sub>	268
10	Об'єм на одну особу м <sup>3</sup> /особу	5,63

Параметри Львівського театру імені Марії Заньковецької



Рис. 8.26 План першого та другого поверхів Театру імені Марії Заньковецької у Львові



Рис. 8.27 План третього поверху Театру імені Марії Заньковецької у Львові

У 2017 році в театрі провели модернізацію із заміною підлогового покриття в глядацькій зоні. Сидіння, встановлені до ремонту, були оббиті спинкою. Після перебудови 40-x внизу та за В роках єдиним звукопоглинальним елементом у залі була публіка. Як наслідок, час реверберації був занадто довгим для театрального майданчика. Вирішено використовувати крісла подібної конструкції, щоб запобігти подальшому збільшенню часу реверберації. Глядацький зал до і після модернізації представлено на рис. 8.28.



Рис. 8.28 Вигляд залу до (а) та після (б) ремонту Метод вимірювання

Акустичні параметри театру вимірювали відповідно до загальних рекомендацій [333], міжнародних стандартів [334] та власного досвіду. Для

оцінки акустичних умов у досліджуваному інтер'єрі обрані параметри реверберації (T20), чіткості (C80) та індексу передачі мови (STI). Заміри проводились при відкритій завісі та типовій сценографії на сцені.

### Модельні дослідження - САТТ, опис моделі та вхідних параметрів

Для оцінки акустичних параметрів театру з повною аудиторією створили числову модель у програмному забезпеченні САТТ-Acoustic (рис. 8.29). Додаток імітує поширення звуку за допомогою вдосконаленої геометричної моделі на основі методу трасування променів і джерел зображення [335, 336]. Модель створена з використанням геометричних даних, зібраних за фотограмметричного коефіцієнтів допомогою методу, а також внутрішніх звукопоглинання та розсіювання поверхонь. Коефіцієнти поглинання підлоги та стін є порівнянними між подібними об'єктами, тому набір коефіцієнтів, виміряних у лабораторіях кафедри механіки та віброакустики був адаптований для Львівської опери. Коефіцієнти поглинання сцени визначили на основі вимірювань, проведених у театрі. Чисельну модель відкалібрували відповідно до виміряного часу реверберації.



Рис. 8.29 Вигляд театру імені Заньковецької всередині, модель САТТ-Acoustic, фактичний стан

Вплив оббивки сидінь на акустичні параметри театру досліджували для трьох груп сидінь – з легкою, середньою та товстою оббивкою (див. рис. 8.30). Поділ на такі групи запропонував Беранек на основі своїх досліджень акустики концертних залів.



Рис. 8.30 Вимірювання коефіцієнтів звукопоглинання крісел з аудиторією у ревербераційній камері

Коефіцієнти звукопоглинання крісел з глядачами та без глядачів для кожного типу оббивки представлено на рис. 8.31. Наведені значення використано як вхідні параметри для розрахункової моделі театру. Моделювання, проведене для різних варіантів сидіння, використовували для вивчення впливу конструкції сидіння на акустичні параметри досліджуваного інтер'єру.



Рис. 8.31 Коефіцієнти звукопоглинання сидінь з і без глядачів [330]

На першому етапі дослідження обчислено акустичні параметри театру імені Марії Заньковецької з глядачами до та після ремонту. Згідно з рекомендаціями літератури, середній час реверберації в кінотеатрі без звукової системи має становити 1,4 с у частотному діапазоні 500 і 1000 Гц. Крім того, характеристика часу реверберації в частотній області повинна бути лінійною і відповідати +/-20% від рекомендованого значення. Для частот понад 2 кГц час реверберації може зменшуватися на 10% на октаву.

Результати моделювання показали, що час реверберації після заміни крісел істотно не змінився. Спостерігається зменшення часу реверберації в діапазоні середніх і високих частот. Середній час реверберації до реновації становив  $T_m = 1,38$  с, після реновації значення зменшилось до  $T_m=1,29$  с. У діапазоні низьких частот час реверберації збільшився, для октавної смуги 125 Гц він змінився з 1,94 с до 2,20 с. Отримані часи реверберації приміщення як до, так і після заміни крісел відхиляються від рекомендованих лінійних характеристик, що характерно для підковоподібних залів. При цьому оздоблювальні матеріали істотно впливають на характеристики часу реверберації. Більшість поверхонь у кінотеатрі - це тверді стіни з низькими коефіцієнтами поглинання у всьому діапазоні частот. Єдиною значною зоною звукопоглинання є аудиторія, яка має високі показники поглинання в діапазоні середніх і високих частот, що призводить до нерівномірних характеристик часу реверберації.

Крім часу реверберації, ми досліджували параметри, що відповідають розбірливості мови STI та чіткості музики C80. На основі числової моделі розраховано параметри для залу з повною аудиторією. Відповідно до [332] STI для театру без звукової системи має бути вище 0,6 на першому поверсі та на середніх балконах. Рекомендоване середнє значення C80 у діапазоні частот 500, 1000 Гц для музичного театру становить від -2 до +3 дБ.



Рис. 8.32 Оцінка значення часу реверберації (орієнтовні розрахунки)

Зміна показника розбірливості мовлення STI до та після реновації наведена в табл. 8.10. Найбільша різниця досліджуваних параметрів становить 0,03 для STI та 0,6 для C80. Нові сидіння мають схожі звукопоглинальні властивості, що пояснюється використанням товстої оббивки в обох випадках. *Таблиця 8.10* 

Пункт	Перед зам	іною	Після заміни		
N⁰	сидінн	5	сидінь		
	STI C80		STI	<i>C80</i>	
1	0,66	5,2	0,67	5,3	
2	0,66	4,7	0,66	4,9	
3	0,63	4,3	0,62	4,8	
4	0,62	3,5	0,60	3,9	
5	0,71	6,5	0,70	7,1	
6	0,68	6,1	0,65	6,2	
7	0,62	4,2	0,62	4,5	
8	0,63	4,1	0,62	3,8	
9	0,64	2,6	0,61	3,2	

Параметри розбірливості STI та C80 до та після реновації

Проаналізовано вплив на акустичні параметри приміщення театру Марії Заньковецької різної товщини оббивки крісел. Розрахунки проводились для залу з аудиторією для трьох різних видів оббивки крісел.



Рис. 8.33 Розраховано час реверберації для залу з аудиторією

Виходячи з результатів, можна помітити, що зміна товщини шарів оббивки на сидіннях не має істотного впливу на час реверберації в залі театру. Зміни спостерігалися лише в діапазоні низьких і середніх частот.

### Таблиця 8.11

N⁰		STI		С80 (500 Гц -1 кГц)			
пункту	Л	С	В	Л	С	В	
1	0,64	0,65	0,66	4.6	4.8	5.2	
2	0,65	0,62	0,66	4.5	4.1	4.7	
3	0,62	0,61	0,63	4.0	3.9	4.3	
4	0,61	0,69	0,62	3.0	3.5	3.5	
5	0,69	0,66	0,71	6.0	6.2	6.5	
6	0,66	0,64	0,68	5.5	5.7	6.1	
7	0,62	0,62	0,62	3.5	4.5	4.2	
8	0,62	0,62	0,63	2.9	3.7	4.1	
9	0,61	0,61	0,64	2.3	2.5	2.6	

STI та C80 для залу з глядачами для різних варіантів оббивки сидінь

У таблиці 8.11 представлено порівняння значень параметрів STI та C80 для різних типів оббивки сидінь у залі. Виходячи з результатів, можна помітити, що зміна товщини оббивки також не має істотного впливу на значення STI та C80. Для крісел з легкою оббивкою отримані результати STI змінюються на 0,08, тоді як найбільша різниця для C80 становить 3,7 дБ.

Також проведено аналіз поглинання окремих поверхонь. На основі цього можна визначити, які зони залу матимуть істотний вплив на акустичні параметри. Було виділили п'ять областей:

- Стіни сцени разом зі сценічним обладнанням, підлога на сцені, у тому числі поглинання декорацією.
- Стіни в аудиторії з ложами, балкони та двері.
- Стеля над аудиторією.
- Глядачі в залі складаються з крісел.

$$A_i = a_i S_i, \tag{8.3}$$

де  $\alpha_i$  – коефіцієнт звукопоглинання даної площі,  $S_i$  – площа поверхні.



Рис. 8.34 Аналіз частки звукопоглинання окремих поверхонь у залі

Проведений аналіз показав, що найбільшу питому вагу в загальній поглинальній здатності залу театру має сцена з обладнанням в діапазоні середніх і високих частот. Загальна частка каскаду становить приблизно 60% для цього діапазону частот. Це пов'язано з дуже великим об'ємом сценічної вежі, в якій було змонтовано сценічне обладнання, а елементи декорацій, підвішені до стелі вежі, а елементи сцени розміщувалися на підлозі сцени. Зал

з м'якими сидіннями дуже суттєво впливає на звукопоглинання в діапазоні низьких частот, де його частка досягає 40%. Частка холу становить близько 30% для середніх і високих частот.

Дослідження показують, що в залах театру найважливішими елементами, що формують акустичні параметри інтер'єру, є сцена разом зі сценічною вежею та залом з м'якими кріслами. Дослідження також показали, що зміна дизайну місць у залі з аудиторією мало впливає на акустичні характеристики залу. Це пов'язано з невеликими змінами поглинання крісел із сидячими на них глядачами, де основним елементом звукопоглинання є людина, що сидить на ньому.

### 8.5. Дослідження часу реверберації лекційної аудиторії

Звук є важливим фактором навколишнього середовища. Попри певну недооцінку порівняно з освітленням, дизайном інтер'єру, системами відображення та управління, якість звуку та рівень шуму є одними з головних чинників, що визначають комфорт приміщення, а також впливають на фізіологію, психологічний стан, когнітивні функції, поведінку та продуктивність роботи людей.

У приміщеннях різного типу: від магазинів і офісів до судових і концертних залів, поганий звук чинить руйнівний вплив на спілкування, продуктивність праці, рівень продаж, задоволеність клієнтів тощо.

Акустика відіграє особливу роль у театральних та концертних залах. Хороше звучання дає змогу отримати максимальне задоволення від музики та залишає незабутні враження від концерту.

Дуже важливо забезпечити хорошу акустику та нейтралізувати всі джерела неприємного шуму, коли мова йде про звук у сфері охорони здоров'я. Комфортне звукове оточення сприяє швидшому одужанню пацієнтів та продуктивнішій праці фахівців, що, у випадку медичних закладів, набуває особливої ваги. В освітніх установах слова викладача є ключем до розуміння предмету. Однак, багато учнів, які сидять на останніх рядах, чують, у кращому випадку, тільки кожне друге слово вчителя. Крім того, часто застосовується принцип взаємодії та групової роботи учнів, що призводить до шуму в лекційній аудиторії.

На якість спілкування між викладачами та студентами впливають акустичні властивості лекційної аудиторії. Показників акустичної якості аудиторії є багато, однак основним показником, який впливає на сприйняття мовної інформації викладача є час реверберації. Саме тому поставлена задача дослідити час реверберації лекційної аудиторії розташованої у Національному університеті «Львівська політехніка».

### Експериментальне дослідження часу реверберації

Об'єктом дослідження є лекційна аудиторії Національного університету «Львівська політехніка», яка заходиться у IV начальному корпусі. Модель аудиторії представлено на рис. 8.35. Лекційна аудиторія виготовлена з цегли, вона займає площу 66 м<sup>2</sup> з об'ємом 196 м<sup>3</sup>. Висота стелі становить 2,975 м. Матеріали, які використані, це скло, штукатурка, паркет, металеві двері та плита ДСП, з якої зроблено парти та лавки. Глядацька частина містить три ряди парт та вміщує 80 студентів. Аудиторія має великі вікна, які забезпечують природне освітлення в денний час та не містить гардин.



Рис. 8.35 Модель лекційної аудиторії

### Розташування вимірювальних пунктів

Час реверберації є одним із важливих критеріїв, які визначають акустичну якість будь-якого приміщення. Найкращими лекційними аудиторіями є ті, які не спотворюють звук, який доходить до слухача [5]. Час реверберації визначається для октавних смуг частот або 1/3 октави.

Відповідно до ISO 3741:2010[6] час реверберації – це час, необхідний для зменшення усередненої за об'ємом густини звукової енергії в замкненому середовищі в 10<sup>(n/10)</sup> разів, тобто на n дБ, після вимкнення джерела шуму.

Відповідно до ISO 3382-2 [7], у нашому випадку час реверберації буде виміряний за допомогою імпульсної перехідної характеристики, яка полягає у зміні в часі звукового тиску в деякій точці приміщення в результаті випромінювання імпульсу Дірака в іншій точці приміщення.

Для того, щоб дослідити як змінюється час реверберації на передніх та задніх партах, а також біля стіни, посередині та біля вікна вибрано 9 вимірювальних пунктів. З метою зменшення впливу прямого випромінювання не можна розміщувати вимірювальні пункти близько любого джерела звуку. Мінімальну відстань між джерелом звуку та вимірювальним пунктом можна розрахувати за формулою [7]:

$$d_{\min} = 2\sqrt{\frac{V}{c \cdot T}}$$
(8.4)

де V - обєм приміщення [м<sup>3</sup>]; c - швидкість звуку [м/c]; T - очікуваний час реверберації [c].

Використовуючи формулу (1) для досліджуваної лекційної аудиторії та взявши мінімальний очікуваний час реверберації 0,5 та максимальний 1,5 ця

відстань становитиме: 
$$d_{\min} = 2\sqrt{\frac{196[m^3]}{343,2[m/c]\cdot 1,5[c]}} = 1,23[m];$$

 $d_{\min} = 2\sqrt{\frac{196[M^3]}{343, 2[M/c] \cdot 0, 5[c]}} = 2,14[M]$ . Відповідно вибираємо більшу відстань

яка становитиме 2,14 м, у нашому випадку найближча відстань від джерела

шуму до вимірювального пункту становить 2,8 м, що відповідає вимогам стандарту.

Схему розташування вимірювальних пунктів та джерела імпульсного шуму представлено на рис. 8.36. Біля кожного вимірювального пункту зазначено максимальний рівень звукового тиску в дБ. В якості джерела імпульсного шуму використано петарди. Постріли проводилися на місці, де зазвичай знаходиться лектор. Мікрофон розміщувався на місці, де зазвичай знаходиться слухові органи слухача, що становить 1,2 м від підлоги.



Рис. 8.36 Схема розміщення вимірювальних пунктів

Імпульсне джерело повинне створювати піковий рівень звукового тиску, за якого початковий рівень кривої спаду буде не менш ніж на 35 дБ перевищувати рівень фонового шуму у відповідній смузі частот. Під час вимірювання Т30 це перевищення має бути не менше 45 дБ. У нашому випадку, як видно з рис. 8.36, мінімальний рівень звукового тиску становить 130,0 дБ, а фоновий рівень звукового тиску 76,5, відповідно різниця буде 130,0-76,5=53,5 дБ, що цілком задовольняє вимогам для знаходження часу реверберації Т30.

Із графіку рівня звукового тиску (sound pressure level) на рис. 8.37 видно, коли відбувся постріл петардою, та як затухає звукова енергія.



Рис. 8.37 Приклад імпульсної характеристики приміщення (Акустичний імпульс, використаний для оцінки часу реверберації)

Для проведення експерименту використано шумомір SVAN 958А. У таблиці 8.12 наведено результати вимірювань часу реверберації в семи октавних смугах від 63 Гц до 4000 Гц, виміряних в 9 різних точках лекційної аудиторії.

Таблиця 8.12

Пинст		Частота, [Гц]								
вимірювання	63	125	250	500	1000	2000	4000	значення,		
1	1.50	1 20	1 4 4	1.00	1 17	1.20	1 1 5			
1	1,36	1,38	1,44	1,28	1,1/	1,20	1,15	1,23		
2	1,85	1,66	1,28	1,05	0,98	1,28	1,17	1,02		
3	1,74	1,58	1,22	1,19	0,94	1,21	1,01	1,07		
4	2,00	1,32	1,51	1,14	1,22	1,34	1,21	1,18		
5	2,23	1,35	1,43	1,39	1,34	1,35	1,15	1,37		
6	2,06	2,07	1,51	1,47	1,16	1,28	1,15	1,32		
7	1,80	1,21	1,05	1,21	1,21	1,24	1,19	1,21		
8	1,71	1,43	1,26	1,28	1,33	1,39	1,21	1,31		
9	1,97	1,56	1,68	1,25	1,30	1,32	1,16	1,28		

### Час реверберації в аудиторії

Для кращого сприйняття результати із таблиці 8.12 представлено у вигляді гістограм для кожної октавної частоти окремо (див. рис. 8.37 - рис. 8.42). Справа на кожному рисунку представлено номери пунктів, для яких проводився експеримент. Варто звернути увагу, що гістограми, які мають на









Рис. 8.39 Час реверберації для частоти f=500[Гц]







Рис. 8.38 Час реверберації для частоти f=250[Гц]



Рис. 8.40 Час реверберації для частоти f=1000[Гц]



Рис. 8.42 Час реверберації для частоти f=4000[Гц]

Як бачимо із результатів розподіл часу по аудиторії відрізняється, особливо на низьких частотах це зумовлено тим, що кожен матеріал має різний коефіцієнт поглинання для різних частот. Час реверберації приміщення може бути виражений одним значенням, використовуючи середнє арифметичне частот 500 Гц і 1000 Гц [8,9]. Середнє значення представлено в табл. 8.13 (останній стовпець) та у вигляді гістограми на рис. 8.43.

Аналізуючи дані з таблиці 8.12 (останній стовпець) та гістограму рис. 8.43 бачимо що зважаючи на те, що пункти проведення експерименту обиралися як близько до вікна так і до стіни [9], час реверберації відрізняється не значно. Найменше середнє значення становить 1,02 с для вимірювального пункту, який знаходиться найближче до джерела шуму, чого і слід було очікувати, а найбільше 1,37 с, для 5 вимірювального пункту, це зумовлено тим, що даний пункт знаходиться посередині кімнати і до нього доходять відбиття від усіх віддалених поверхонь аудиторії. Отже, різниця в 0,35 секунд між різними вимірювальними пунктами є не значною, зважаючи, що на вікнах відсутні гардини, присутність яких покращила б ситуацію із розподілом часу реверберації. Також наявність студентів ще зменшить час реверберації та зменшить різницю, а відповідно можна ствердити що дана лекційна аудиторія є комфортною для проведення лекційних занять, однак наявність гардин із цупкої шумопоглинаючої тканини ще зменшить час реверберації, що призведе до покращення зрозумілості мови лектора.



Рис. 8.43 Середній час реверберації для частот f=(500+1000)/2 [Гц]

### 8.6. Дослідження методів визначення часу реверберації

На сьогоднішній день існує багато систем визначення часу реверберації на основі аналізу зареєстрованого імпульсного відгуку приміщення на

збудження імпульсним шумом, однак вони дають змогу обробляти тільки по одному аудіо-файлу. Натомість науковці для проведення досліджень з метою удосконалення методів визначення часу реверберації потребують обробляти великі кількості файлів. Саме тому поставлена задача розробити систему, яка б дала змогу автоматизувати процес пакетного опрацювання великої кількості аудіо-файлів, а для цього необхідно вибрати оптимальний метод, або удосконалити існуючий з метою реалізації у системі, що розробляється.

Значний внесок у створення методик розрахунку часу реверберації зробили вчені В.Себін, М.Шредер, Л.Беранек, Л.Бреховських, К.Ейрінг, В.Абракітов та інші [344-346]. Кожна із цих методик дала змогу підвищити точність розрахунків, але водночас кожна з них має свої переваги та недоліки. У зв'язку із цим зусилля сучасних дослідників спрямовані на уточнення розрахункових формул часу реверберації [43], а також дослідженню методів визначення обвідної сигналу для знаходження часу реверберації та розробці систем у яких реалізовані ці методи [347].

Для автоматизації процесу аналізу зареєстрованих аудіофайлів спроетковано підсистему пакетного опрацювання аудіо-файлів для визначення часу реверберації. Підсистема розроблялася враховуючи всі вимоги стандарту ISO 3382-2 [343].

Під час розроблення підсистеми враховано, що необхідно відступити на 5 дБ від пікового значення, та при різниці між піковим значенням та фоновим шумом менше 35 дБ програма видає помилку, що файл не задовільняє вимогам. Підсистема розроблялася у середовищі MatLab, оскільки він має достаті засоби для вирішення подібного роду задач. Під час розроблення враховано те, що аудіо файли інколи можуть мати невірну контрольну суму і видавати помилку під час відкриття у MatLab. Тому розроблено функцію, яка виправляє такі файли та дає змогу їх опрацьовувати. Алгоритм роботи розробленої підсистеми представлено на рис. 8.44.



Рис. 8.44 Алгоритм роботи підсистеми визначення часу реверберації по аудіо-файлах

Аудіо-файл, який ми отримуємо із шумоміра Svan958A, містить у кінці інформацію про діапазон вимірювань, опорний рівень звукового тиску та коефіцієнт підсилення. Дані параметри зчитуються підсистемою автоматично. Маючи ці дані підсистема визначає рівень звукового тиску у децибелах за формулою:

$$SPL = 20\log 10 \left( \frac{|X| \cdot \text{RefLev}}{PakSens} \right)$$
(8.5)

де PAKsen=0,00249729590104124 - чутливість для визначення рівня звукового тиску у Па; RefLev=20 [мПа] - опорний звуковий тиск 20 мПа.

### 8.7. Метод змінного середнього

У методі змінного середнього вихідні дані згладжуються за наступним правилом [8]:

$$ys_{i} = \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^{N} y(\mathbf{i}+k)$$
(8.6)

де 2N+1 - кількість точок, які обирають для згладжування. Тобто, зліва і праворуч від поточної точки вибирається по N точок. Дані, розташовані в точках, близьких до кордонів відрізка не згладжуються, тому що не вистачає точок праворуч або ліворуч від поточної, в якій у даний момент проводиться згладжування.

Саме тому для аналізу у системі, що розробляється аналізується часовий відрізок більший від потрібного, щоб не спотворювалися результати. Так само відрізається весь сигнал, який знаходиться перед піковим значення, адже середнє значення між фоновим шумом і піковим значення значно спотворює результати. Метод змінного середнього використовують перед використанням методу найменших квадратів для знаходження оптимального часового відрізку для аналізу. Без використання попередньої обробки сигналу методом змінного середнього результати визначення часу реверберації мали абсолютну похибку у 5 разів більшу, відповідно, результати були просто неприйнятними. Звідси висновок, що метод найменших квадратів для визначення обвідної сигналу з метою визначення часу реверберації можна використовувати тільки якщо використовується попередня обробка сигналів.

На рис. 8.45 представлено результати згладжування сигналу методом змінного середнього для 10, 100 та 1000 точок згладжування. Як бачимо із графіку зі збільшенням точок згладжування сигнал стає прийнятнішим для подальшого опрацювання.


Рис. 8.45 Результати згладжування для різної кількості точок згладжування

На наступному кроці постала задача добору оптимальної кількості точок для згладжування, у зв'язку із чим поставлена задача дослідити як мінятиметься сумарна похибка визначення часу реверберації для 6 експериментів у порівнянні з системою Dirac. Із отриманих обчислень вийшло, що найменша похибка отримується при згладжуванні сигналу 2000 сусідніх точок. Графік залежності кількості сусідніх точок для згладжування теж це підтверджує і представлений на рис. 8.46 У зв'язку з чим у системі обрано 2000 тисячі сусідніх точок для згладжування сигналу.



Рис. 8.46 Дослідження впливу кількості сусідніх точок на сумарну похибку

Для дослідження точності роботи підсистеми взято результати виміряного часу реверберації Т20 (рис. 8.47) для частоти f=500 Гц, та f=1000 Гц, які найчастіше використовуються для оцінки акустичної придатності приміщення.



Рис. 8.47 Ресстрація відгуку лекційної аудиторі на імпульсне джерело шуму

Результати роботи розробленої підсистеми та отримані із програми Dirac [349] представлено у таблиці 8.13 та 8.14.

Таблиця 8.13

Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9
експерименту									
Dirac, c	1,220	1,230	1,100	1,240	1,220	1,180	1,250	1,150	1,260
Шредер, с	1,141	1,245	1,246	1,144	1,226	1,235	1,220	1,182	1,269
Найменших	1,349	1,288	1,309	1,221	1,378	1,383	1,410	1,202	1,284
квадратів, с									

Час реверберації Т20 для частоти f=500 Ги

Таблиця 8.14

Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9
експерименту									
Dirac, c	1,180	1,160	1,130	1,240	1,170	1,260	1,140	1,200	1,260
Шредер, с	1,199	1,138	1,240	1,136	1,183	1,159	1,171	1,263	1,259
Найменших	1,283	1,351	1,261	1,307	1,303	1,331	1,155	1,293	1,278
квадратів, с									

Час реверберації Т20 для частоти f=1000 Ги

Оскільки ми працюємо із величинами приблизно однакового значення, можна не використовувати відносну похибку, а скористатися тільки абсолютними похибками для оцінки точності методів. Отримані абсолютні похибки методу Шредера та удосконаленого методу найменших квадратів представлено на рис. 8.48 для частоти 500 Гц та на рис. 8.49 для частоти 1000 Гц.



Рис. 8.48 Абсолютна похибка для частоти 500 Гц



Рис. 8.49 Абсолютна похибка для частоти 1000 Гц

Як бачимо із графіків на рис. 8.48 та рис. 8.49 меншою похибка є у методу Шредера. Щоб краще відобразити різницю, визначимо суму абсолютних похибок всіх експериментів. Результати представлено у таблиці 8.15.

Таблиця 8.15

# Сума абсолютних похибок для 9 експериментів у порівнянні із результатами отриманими із системи Dirac [9]

	Сума абсолютних похибок для 9 експериментів, с					
Частота, Гц	Метод Шредера	Метод найменших квадратів				
500	0,467	1,012				
1000	0,464	0,823				

Аналізуючи результати сумарної абсолютної похибки по всіх експериментах бачимо, що максимальна сумарна похибка для методу Шредера становить 0,467 *c*, що у 2 рази менше за метод найменших квадратів.

## 8.8. Адаптивна акустика

В Україні вступили в дію нові будівельні норми щодо закладів культури. Вони набрали чинності з 1 листопада 2019 року і стосуються проєктування нових і реконструкції існуючих будівель закладів культури – кінотеатрів, театрів, концертних залів, музеїв тощо. Якість звуку – це не лише правильне обладнання, а й належне архітектурне планування зали за формою, матеріалами і так далі. У нових ДБН [350] щодо закладів культури переглянуто і оновлено ці вимоги, щоб майбутні концертні зали, театри та зали в кінотеатрах будувалися кращими – з кращим звуком без реверберації та інших дефектів. Так, наприклад, у нових ДБН вказано, що прямокутна форма зали та плоска горизонтальна стеля допускається лише для планування невеликих лекційних зал до 200 осіб. А на більшу місткість глядачів краще робити трапецієподібну форму з кутом розкриття 10-12 градусів і т.д.

У ДБН також зазначено, що одним із важливих етапів акустичного проєктування повинно бути комп'ютерне моделювання і розрахунок локальних акустичних критеріїв. Це потрібно для оцінки розбірливості мови, чіткості звучання, гучності тощо. Саме тому тема роботи присвячена удосконаленні концертних зал прямокутної форми є актуальною.

Для швидкої побудови складних моделей пропонується спочатку основну модель побудувати у системі SketchUP (див. рис. 8.50), а потім експортувати до системи CattAcoustic. Вже у системі CattAcoustic пропонуєтсья параметрично задавати акустичні елементи, такі як плити з акустичних елементів чи півкруглі елементи, якими пропонується прикрити прямокутні колони. Запропонована модель є універсальною і її можна виконати таким чином, що повертаючи плити з акустичних матеріалів на стелі чи опускаючи жалюзі із цупких тканин ми можемо змінювати час реверберації даного

приміщення, що у свою чергу дає можливість використовувати його як для проведення конференцій так і як концертний зал.



Рис. 8.50 Модель концертної зали у системі SketchUP

# Дослідження рівня звукового тиску та часу реверберації

Для того, щоб дослідити рівномірність розподілу рівня звукового тиску (sound pressure level SPL) у моделі ми задали, що джерело звуку випромінює білий шум 94 дБ. На рис. 8.51 представлено варіант із підвішеними акустичинми елементами паралельно стелі. Натомість на рис. 8.52 показано модель із панелями розміщеними під різними кутами, таким чином, щоб спрямовувати акустичну енергію також до слухачів, що на балконі.



Рис. 8.51 Модель концертної зали у системі із акустичними панелями розміщеними паралельно стелі



Рис. 8.52 Використання поворотних панелей для рівномірного доведення звукових хвиль до задньої стінки

Результати розподілу рівня звукового тиску представлено на рис. 8.53 та рис. 8.54. Порівнюючи їх можемо сказати, що модель із повернутими акустичними панелями дає рівномірніший розподіл звукової енергії, натомість із розміщеними паралельно стелі має більші значення ближче до джерела звуку і менший рівень звукового тиску на балконі.



Рис. 8.53 Розподіл звукової енергії (акустичні елементи паралельно до стелі)



Рис. 8.54 Розподіл звукової енергії (акустичні елементи повернуті під різними кутами)

Час реверберації теж таким чином можна змінювати, як бачимо середній час реверберації для частоти 1kГц становить 0,86 с для моделі як на рис. 8.55 і 0,92 с для моделі як на рис. 8.56. Отже використовуючи рухомі та обертові акустичні елементи ми можемо робити адаптивні акустичні приміщення різного призначення як для концентів так і проведення конференцій.



Рис. 8.55 Статистичний розподіл часів реверберації (акустичні елементи паралельно до стелі)



Рис. 8.56 Статистичний розподіл часів реверберації (акустичні елементи повернуті під різними кутами)

#### 8.9. Висновки до 8 розділу

Розроблено конвертер, який дає змогу експортувати геометричні моделі приміщень з системи SketchUP у систему Catt-Acoustic, а також автоматично задавати коефіцієнти поглинання матеріалів відповідно до заданих в системі SketchUP. Розроблений конвертер дає змогу значно скоротити затрати часу на побудову моделей приміщень для дослідження їх акустичних характеристик.

Розроблено метод добору коефіцієнтів звукопоглинання акустичних матеріалів для системи моделювання акустики приміщень Catt-Acoustic, який полягає у зворотному визначенні коефіцієнтів через формулу Сабіна і дає змогу за одну ітерацію досягнути точність визначення часу реверберації до 0,5 с.

Розроблено підсистему, яка дала змогу дослідити на експериментальних даних точність методів зворотного інтегрування та найменших квадратів. На основі результатів досліджень удосконалено метод найменших квадратів, використавши попередню обробку сигналу методом змінного середнього. Проте удосконалення не дало змогу досягнути точності методу Шредера відносно системи Dirac, що можна пояснити тим, що система Dirac теж використовує метод Шредера. Розроблено математичне та програмне забезпечення підсистеми автоматичної оцінки акустики приміщень імпульсним методом.

Запропоновано спосіб побудови моделей приміщень для їх акустичного аналізу, використовуючи параметричні моделі, що дало змогу швидко проводити їх модифікацію з метою отримання оптимальних акустичних характеристик. На прикладі показано, що використання акустичної адаптації приміщень дає змогу покращити його акустичні характеристики та розширити межі його використання.

368

#### ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень, спрямованих на вирішення актуальної науково-прикладної проблеми подальшого розвитку моделей, методів та САПР засобів дослідження та покращення акустичних властивостей закритих приміщень, отримано наукові та практичні результати:

1. Показано роль основних чинників розвитку акустометрії з погляду домінуючого впливу сучасних інформаційних технологій, комп'ютерних наук та методів автоматизованого проєктування засобів дослідження акустики приміщень. По-перше, це широке розповсюдження засобів комп'ютерної техніки дослідження параметрів оточуючого В задачах середовища, сенсорики, людино-машинної взаємодії, зокрема відповідно до концепції UC та Індустріального Інтернету Речей ПоТ. По-друге, це подальший розвиток інформаційно-вимірювальних наукових підходів технологій, зокрема технології SMART та концепцій «розумної» техніки, «розумного» будинку тощо. В акустометрії цей чинник враховує розвиток напрямку адаптивної акустики. По-третє, це подальший розвиток інформаційних моделей та САП, як в проєктуванні та дослідженні акустики приміщень, так і формуванні та перетворенні інформативних сигналів акустометрії.

2. Розроблено новий метод акустометрії з формулюванням оригінального терміну - векторне імпульсно-частотне зондування (ІЧЗ). Цей метод визначається комбінацією та синергією трьох взаємодоповнюваних науково значимих рішень:

- дослідження проводять шляхом збурень зондуючих імпульсів звукових коливань, тривалість та спектр яких оптимізується відповідно до задач та умов експерименту;
- формування зондуючих імпульсів у досліджуваному приміщенні відбувається з використанням векторного (селективно-направленого в просторі) активування звукових коливань;
- синтез набору інформативних сигналів відбувається шляхом формування

імпульсів звукових коливань з заданим відповідно до алгоритму дослідження набором одночастотних коливань, детектування яких здійснюється на основі кореляційних та автокореляційних методів частотної селекції.

3. Показано, що розроблення систем акустометрії та їх САПР об'єднує ослідовність взаємозв'язаних етапів. Із метою дослідження ефективності частотної селекції сигналів акустометрії та виявлення закономірностей такої селекції з врахуванням параметрів перетворення сигналів розроблено математичну модель та програмне забезпечення M-Signal. Інформативною величиною ефективності частотної селекції є нормовані значення коефіцієнту перетворення сигналу  $K_n(F/F_{ir})$ . Частотна селекція реалізується методами кореляційного перетворення Mode A та квадратурного детектування Mode Q.

4. Із метою розробки методу модельного дослідження комплексної взаємодії звукової хвилі вирішено задачу синтезу макромоделі, яка поєднує процеси формування сигналів трьох типів – електричних, акустичних та теплових. Розроблено новий метод синтезу SPICE моделей акустичних компонентів, що відрізняється від відомих поєднанням в структурі єдиної макромоделі параметрів електричного та акустичного імпедансів. Така макромодель поєднує структури MEMS мікрофонів, що виконують функцію вимірювального перетворення тиску (Р-зонд), та MEMS теплових сенсорів потоку, що виконують функцію вимірювального перетворення швидкості потоку (U-зонд) повітря.

5. Обгрунтована актуальність синтезу SPICE моделей сигнальних трактів систем акустометрії, як етапу комплексу науково-прикладних робіт з розроблення засобів дослідження та поліпшення акустичних властивостей закритих приміщень. Розглянуто основні методи та макромоделі функціонального аналізу сигнальних трактів, зокрема наведено ілюстрацію бібліотек математичного аналізу в сучасних версіях SPICE-сумісних систем модельних досліджень. Представлено етапи модельного дослідження сигналів акустометрії з використанням методу FFT та синтезатора фільтру Active Filter

Designer. Представлено етапи та приклади розроблення моделі симулятора віртуальних сигналів Data@Sim, що призначений для удосконалення методів їх перетворення та верифікації моделей САПР акустометрії.

6. Сформульоване протиріччя між вимогами до просторової роздільної здатності та частотної селективності. Для вирішення даного протиріччя розроблено метод оптимізації перетворення сигналів з аналізом функції залежності ширини імпульсу звукових коливань від параметрів сигналу. Представлено етапи та приклади реалізації цього методу. Відповідно до основних підходів запропонованої математичної моделі та програмного забезпечення M-Signal розрахунку ефективності частотної селекції сигналів вирішено задачу розроблення вбудованої системи дослідження акустичних параметрів AMES. Її базою є програмована система на кристалі PSoC, на основі якої здійснено структурно-алгоритмічну реалізацію формування та програмного керування процесами вимірювання, зокрема встановлення частоти, фази та гармоніки. Крім функціональних можливостей керування процесами вимірювання, перевагою вбудованої системи AMES є реалізація вхідного тракту змішаного сигнального перетворення на основі методу селективного підсилення заряду.

7. Проведено аналіз проблем, які виникають під час дослідження акустичних характеристик приміщень з урахуванням вимог подальшого розвитку інформаційних технологій у галузі акустометрії. Показано, що основним протиріччям є реалізація прецизійних та достовірних вимірювань під час переходу від доволі унікальних методів та засобів досліджень акустики до малогабаритних масових пристроїв сучасної комп'ютерної техніки. Відтак акцентується, що важливою складовою вирішення цього протиріччя є комплексна верифікація засобів дослідження акустики. Із метою вирішення цієї проблеми запропоновано метод та послідовність такої верифікації.

8. Розроблено інверсний метод визначення опору потокові повітря пористих матеріалів використовуючи модель Мікі, який дав змогу представити коефіцієнти звукопоглинання в діапазоні чутних частот одним числом –

опором потоку повітря, що дало змогу порівнювати результати визначення коефіцієнтів звукопоглинання отриманими із імпедасної труби та лабораторної установки продуванням потоком повітря пористих матеріалів.

9. Удосконалено метод визначення опору потокові повітря який описує залежність між швидкістю повітряного потоку та перепадом тиску ( $q(\Delta p)$ ), шляхом вибору діапазону даних для лінійної апроксимації використовуючи функцію залежності опору повітряному потоку до швидкості повітряного потоку, що дало змогу підвищити точність та повторюваність вимірювань порівняно з раніше використовуваним підходом.

10. Розроблено метод синтезу акустичних матеріалів, який дав змогу використовуючи інверсний метод дібрати товщину та опір потоку повітря синтезованого пористого матеріалу для отримання необхідних коефіцієнтів звукопоглинання в заданому діапазоні частот.

11. Розроблено інформаційну модель підсистеми добору звукоізоляції будівельних конструкцій, яка включає базу даних акустичних матеріалів, що дало змогу автоматизувати процес проєктування звукоізоляції будівель. У системі передбачено автоматичні фільтри матеріалів, які дають змогу показувати користувачу тільки ті матеріали, які відповідають вимогам конструкції та будівельним нормам для даного типу будівлі та типу кімнати. У підсистемі передбачено автоматичний експорт сформованих проєктів Розроблено інформаційне, програмне та методичне забезпечення підсистеми.

12. Розроблено конвертер, який дає змогу експортувати геометричні моделі приміщень з системи SketchUP у систему Catt-Acoustic, а також автоматично задавати коефіцієнти поглинання матеріалів у відповідності до заданих в системі SketchUP. Розроблений конвертер дає змогу значно скоротити затрати часу на побудову моделей приміщень для дослідження їх акустичних характеристик.

13. Розроблено метод добору коефіцієнтів звукопоглинання акустичних матеріалів для системи моделювання акустики приміщень Catt-Acoustic, який полягає у зворотному визначенні коефіцієнтів через формулу Сабіна і дає змогу за одну ітерацію досягнути точність визначення часу реверберації до 0,5 с.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Голяка Р.Л., Лобур М.В., Мельник М. Р. Методи дослідження акустичних властивостей приміщень з покращеною селективністю : монографія / за ред. Р.Л. Голяки ; М-во освіти і науки України, Нац. унт «Львівська політехніка». Львів: Новий-світ-2000, 2024. 245 с.
- Мельник М. Р. Комплексні моделі вбудованих систем in-situ акустометрії. Системи вбудованої самодіагностики мікроелектронних сенсорних пристроїв : монографія / за ред. Р. Л. Голяки ; М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львівська політехніка». Львів: Новий-світ-2000, 2024. С. 182–237.
- Андрійчук М. І., Лобур М. В., Мельник М. Р. Моделювання середовищ із заданими акустичними і електромагнітними характеристиками : монографія. Львів: СПОЛОМ, 2023. 272 с.
- Pytel K., Noga H., Melnyk M. Wpływ zanieczyszczenia powietrza na zdrowie i środowisko naturalne oraz wybrane działania prewencyjne. Problemy ochrony i inżynierii środowiska : monografia / red. M. Banaś. Krakow: Wydaw. Akad. Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie, 2023. S. 95– 102.
- Banaś M. Pytel K., Kosobutskyy P., Lobur M., Melnyk M. Electromagnetic modelling of the optical systems : monografia. Kraków: Wydaw. Nauk. Uniw. Ped., 2021. 186 p.
- Łukaszewicz A., Skorulski G., Melnyk M., Kernytskyy A., Zdobytskyi A., Kolesnyk K. Engineering drawing education using CAD tools. CAD in machinery design. Implementation and educational issues. XXIX International Polish-Ukrainian conference : collective monograph. Kraków: Wydaw. AGH, 2023. P. 95–102.
- 7. Trochimczuk R., Łukaszewicz A., Melnyk M., Kernytskyy A. Design of mechatronics systems using CAx environment. Methods and tools in CAD -

selected issues : monograph / Białystok Univ. of Technology. Białystok: Publ. House of Białystok Univ. of Technology, 2021. P. 7–14.

- Мельник М., Керницький А., Винарович Р., Шварц М., Попович I. Інформаційна система визначення рівня шуму на вибраних вулицях міста Львова. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Інформаційні системи та мережі. 2024. Вип. 16. С. 121–132.
- Мельник М., Винарович Р., Гасюк Ю., Шварц М. Удосконалення навігаційної системи пристрою дефектоскопії підземних труб. Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2024. Вип. 6, № 1. С. 117–126.
- Мельник М., Сало Ю. Математична модель локалізації поширення інфразвукового сигналу. Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2024. Вип. 6, № 1. С. 169–177.
- Melnyk M., Patereha Yu. Prediction of the occurrence of stroke based on machine learning models. Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2024. Вип. 6, № 1. С. 17–27.
- Гасюк Ю., Йовбак А., Мельник М., Винарович Р., Попович І. Проблеми безпеки в системах розумного дому. Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2023. Вип. 5, № 1. С. 71–81.
- Melnyk M., Pytel K., Orynchak M., Tomyuk V., Havran V. Analysis of artificial intelligence methods for rail transport traffic noise detection. Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2022. Вип. 4, № 1. С. 107–116.
- Андрійчук М. І., Мельник М. Р. Синтез плоских хвилеводних антенних решіток з урахуванням взаємного впливу випромінювачів. Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка. 2021. Т. 64, № 9. С. 538–549.
- 15. Гавран В., Мельник М., Оринчак М. Дослідження методів прогнозування рівня шуму від рейкових транспортних засобів на прикладі м. Львова. Вісник Національного університету "Львівська

політехніка". Серія: Інформаційні системи та мережі. 2021. Вип. 10. С. 33–40.

- Melnyk M., Kernyskyy A., Lobur M. Comparison of methods for measuring reverberation time. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Комп'ютерні системи проектування. Теорія і практика. 2019. № 908. С. 11–17.
- Мельник М., Керницький А., Рубаха Я., Камісінскі Т. Метод визначення опору потоку повітря пористих матеріалів на основі коефіцієнтів звукопоглинання. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Інформаційні системи та мережі. 2018. Вип. 6. С. 52–65.
- Melnyk M., Kamisiński T., Kernyskyy A., Lobur M. Automated evaluation of acoustical quality of opera houses and concert halls by beranek's method. Visnyk of Lviv Polytechnic National University. Series: Computer Design Systems. Theory and Practice. 2017. No. 882. P. 57–63.
- Мельник М. Р., Винарович Р. І., Квасниця Т. Р., Керницький А. Б. Проектування всеспрямованого джерела звуку для автоматизації процесу акустичних вимірювань. Комп'ютерні технології друкарства. 2017. № 2 (38). С. 97–106.
- Мельник М. Р., Керницький А. Б., Рубаха Я., Камісінські Т. Розроблення конвертера 3D-моделей приміщень з системи SketchUP у систему Catt-Acoustic. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Інформаційні системи та мережі. 2018. № 901. С. 89–96.
- Melnyk M., Martynyak A., Kernytskyy A. Reverberation time study of an auditorium. Bulletin of Lviv Polytechnic Nat. University. Series: Computer Design Systems. Theory and Practice. 2016. No. 859. P. 56–61.
- Мельник М., Керницький А. Інформаційна модель бази даних акустичних матеріалів. Комп'ютерні технології друкарства. 2017. № 1 (37). С. 118–128.

- Мельник М. Р., Керницький А. Б. Дослідження методів визначення часу реверберації Т20. Комп'ютерні технології друкарства. 2017. № 1 (37). С. 102–109.
- Melnyk M., Kernytskyy A., Zajac P., Szermer M., Maj C., Zabierowski W. Optimization of microelectric actuator design using golden section search to get the defined output characteristics. Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Series: Computer Design Systems. Theory and Practice. 2014. No. 808. P. 77–84.
- 25. Plecinski P., Bokla N., Klymkovych T., Melnyk M., Zabierowski W. Comparison of representative microservices technologies in terms of performance for use for projects based on sensor networks. Sensors (Switzerland). 2022. Vol. 22, iss. 20. 7759.
- Kalwar A., Kurdziel F., Pytel K., Gumula S., Lobur M., Melnyk M. The use of information systems for regulation of gas engine operating parameters. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1016 : CAD in machinery design: implementation and educational issues CADMD 2020, Lviv, Ukraine, 26-27 Nov. 2020. 012020.
- 27. Melnyk M., Kernyskyy A., Mykhalyna Y., Pytel K. Experimental study of the time of reverberation of a sacred building having a cruciform architecture. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1016 : CAD in machinery design: implementation and educational issues CADMD 2020, Lviv, Ukraine, 26-27 Nov. 2020. 012023.
- Iwaniec J., Litak G., Iwaniec M., Margielewicz J., Gaska D., Melnyk M., Zabierowski W. Response identification in a vibration energy-harvesting system with quasi-zero stiffness and two potential wells. Energies. 2021. Vol. 14, iss. 13. 3926.
- Andriychuk M., Melnyk M. Synthesis of plane waveguide arrays taking into account mutual coupling of radiators. Radioelectronics and Communications Systems. 2021. Vol. 64, iss. 9. P. 471–481.

- 30. Rubacha J., Kinash R., Kamisiński T., Binek W., Baruch K., Chojnacki B., Pilch A., Melnyk M. Analysis of the acoustic parameters of the Maria Zankovetska theatre in the Lviv before and after modernisation of the audience. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 471, iss. 8. : 3rd World multidisciplinary civil engineering, architecture, urban planning symp. WMCAUS 2018, Prague, Czech Republic, 18-22 June 2018. 145505.
- Melnyk M., Kernytskyy A., Lobur M. Comparison of methods for measuring reverberation time. Machine Dynamics Research. 2018. Vol. 42, No. 2. Pp 27–34.
- Melnyk M., Kernytskyy A., Stefanskyy A. Development of CAD structure for design of aerostatic complex. Machine Dynamics Research. 2013. Vol. 37, No. 3. P. 61–65.
- 33. Melnyk M., Salo Y., Timofiejczuk A., Sitek W., Popovych I., Vynarovych R. Mathematical model for attenuated infrasound wave propagation. 2024 29th IEEE Intern. seminar/workshop "Direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory" DIPED 2024, Tbilisi, Georgia, 11-13 Sept. 2024. P. 231–235.
- 34. Klymkovych T., Bokla N., Matviykiv O., Stakhiv V., Melnyk M. Numerical simulation and analysis of the acoustic standing wave field stability in acoustofluidic microchannel. 2022 18th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2022, Polyana, Ukraine, 7-11 Sept. 2022. P. 57–60.
- 35. Andriychuk M., Melnyk M., Orynchak M. Investigation of response from the micro objects of complex shape irradiated by acoustic wave. 2023 IEEE 17th Intern. conf. on the experience of designing and application of CAD systems CADSM 2023: proc., Jaroslaw, Poland, 22-25 Febr. 2023. P. 18–22.
- 36. Bokla N., Klymkovych T., Matviykiv O., Stakhiv V., Melnyk M. Design and simulation of microfluidic Lab-chip for detecting heavy metals in water samples. 2021 17th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and

methods in MEMS design MEMSTECH 2021, Polyana, Ukraine, 12-16 May 2021. P. 46–49.

- 37. Orynchak M., Melnyk M., Havran V. Methods for forecasting the noise level of rail vehicles. 2021 26th IEEE Intern. seminar/workshop "Direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory" DIPED 2021, Tbilisi, Georgia, 8-10 Sept. 2021. P. 253–256.
- 38. Matviykiv O., Klymkovych T., Bokla N., Lobur M., Melnyk M., Timofiejczuk A. Simulation of acoustophoretic separation of microplastic particles in mkFluidic Lab-chip. 2020 16th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2020, Lviv, Ukraine, Apr. 22–26, 2020. P. 123–126.
- 39. Guzowski B., Gozdur R., Melnyk M., Lobur M., Matviykiv O. Efficiency evaluation of photovoltaic power converters for ultra-low power supply systems. 2019 IEEE XVth Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2019, Polyana, 22-26 May 2019. P. 56–60.
- 40. Melnyk M., Kamisinski T., Rubacha J., Majchrzak A. Application of MEMS sensors to the automation of a laboratory stand for the measurement of the flow resistance of porous materials. 2018 14th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2018, Lviv. Ukraine, 18-22 Apr. 2018. P. 28–34.
- Depa K., Melnyk O., Melnyk M., Bokla N., Lobur M. The autonomous power supply for systems of acoustic climate control and traffic flows. 2018 14th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2018, Lviv. Ukraine, 18-22 Apr. 2018. P. 268–271.
- 42. Melnyk M., Kernyskyy A., Rubacha J., Kamisiński T. SketchUP to Catt-Acoustic converter of interior design 3D models. 2018 23rd IEEE Intern. seminar/workshop "Direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory" DIPED 2018, Tbilisi, Georgia, 24-27 Sept. 2018. P. 165–169.

- 43. Melnyk M., Kernyskyy A., Pukach P. Development of subsystems for reverberation time definition in lecture auditorium. 2017 IEEE 14th Intern. conf. on the experience of designing and application of CAD systems CADSM 2017:proc., Lviv - Polyana, Ukraine, 21-25 Febr. 2017. P. 354–356.
- 44. Diveyev B., Konyk S., Melnyk M., Vysocka C. Acoustical performance of layered beams in the lower frequency range. 2017 13th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2017, Lviv. Ukraine, 20-23 Apr. 2017. P. 91–95.
- 45. Melnyk M., Basalkevych O. Identification of moving objects in video by means of a graph model. 2016 12th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2016, Lviv Polyana, Ukraine, 20-24 Apr. 2016. P. 170–174.
- Knapkiewicz P., Melnyk M., Teslyuk V., Dziuban J., Lobur M., Szermer M. Mechatronic laboratory stand. 2016 12th IEEE Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2016, Lviv -Polyana, Ukraine, 20-24 Apr. 2016. P. 31–33.
- 47. Melnyk M. Development of a method for automated selection of sound absorbtion coefficients. Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: Computer Design Systems. Theory and Practice. 2019. Issue 1 No. 1. P. 61–70.
- 48. Melnyk M., Vynarovych R., Kvasnytsya T., Lobur M. Designing of omnidirectional speaker for automation of acoustic measurement process.
  2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)
  : proceedings of 14th International conference, 20–24 Feb., 2018, Lviv, Slavske, Ukraine. 2018. P. 380–383.
- 49. Melnyk M., Lobur M., Kernyskyy A., Szermer M., Zajac P., Maj C., Zabierowski W. Custom method for automation of microbolometer design and simulation. 2015 22nd International Conference Mixed Design of

Integrated Circuits & Systems MIXDES 2015: proc., Toruń, Poland, 25–27 June, 2015. P. 301–304.

- 50. Melnyk M., Kernytskyy A., Lobur M., Zajac P., Maj C., Zabierowski W., Szermer M., Napieralski A. Applying the golden section search in optimization of micro actuator design. Intern. conf. on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics CADSM 2015, Lviv - Polyana, Ukraine, 24-27 Feb. 2015. P. 53–56.
- 51. Melnyk M., Teslyuk V., Dziuban J., Knapkiewicz P., Kernytskyy A., Lobur M. Comparative analysis of simulation results and experimental data of deflection of silicon membrane of MEMS pressure sensor. 2015 XI International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design MEMSTECH 2015, Lviv - Polyana, Ukraine, 2-6 Sept. 2015. P. 14–17.
- 52. Melnyk Mykhaylo, Denysyuk Pavlo, Kernytskyy Andriy, Savitska Olha. System for student knowledge control. 2013 12th Int. Conf. on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics CADSM 2013, Polyana, Ukraine, 19-23 Feb. 2013. P. 451–452.
- 53. Melnyk M., Lobur M., Kernytskyy A., Szermer M., Zajac P., Zabierowski W. Application of a genetic algorithm for dimension optimization of the MEMSbased accelerometer. Proceedings of the 20th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems - MIXDES 2013, Gdynia, Poland, 20-22 June. 2013. P. 352–354.
- 54. Kernytskyy O., Kernyskyy A., Melnyk M., Łukaszewicz A., Banaś M., Pytel K. Software development methods of reverse engineering used in mechanical systems // CAD in machinery design. Implementation and educational issues : proceedings of the XXXI International conference CADMD 2023, Supraśl, Poland, 26-28 October, 2023. P. 58.
- 55. Mykhaylo Melnyk, Andriy Kernyskyy, Mykhaylo Lobur, Andriy Zdobytskyj, Andrzej Łukaszewicz, Krzysztof Pytel. Investigation of sound level meters accuracy in determining the equivalent sound level. XXIX International

Polish-Ukrainian Conference CAD in Machinery Design Implementation and Educational Issues CADMD 2021, Krakow, Poland, 9-10 Dec. 2021. P. 22.

- 56. Mariia Orynchak, Volodymyr Havran, Mykhaylo Melnyk. Tram noise level determination analysis case study from Lviv. XXIX Int. Polish-Ukrainian Conf. CAD in Machinery Design Implementation and Educational Issues CADMD 2021, Krakow, Poland, 9-10 Dec. 2021. P. 31-32.
- 57. Rubacha Jaroslaw, Kinash Roman, Kamisiński Tadeusz, Binek Wojciech, Baruch Katarzyna, Chojnacki Bartlomiej, Pilch Adam, Melnyk Mykhalo. Analysis of the acoustic parameters of the Maria Zankovetska theatre in the Lviv before and after modernisation of the audience // World multidisciplinary civil engineering-architecture-urban planning : symposium : abstract collection book, Prague (Czech Republic), 18–22 June 2018. – 2018. – C. 562.
- 58. Mykhaylo Melnyk, Andriy Kernyskyy, Muhaylo Lobur. Comparison of methods for measuring reverberation time. XXV Polish-Ukrainian conference on "CAD in machinery design-implementation and educational problems" : book of abstracts, Bielsko Biala, Poland, October 20-21, 2017. P. 29–30.
- 59. Kernyskyy A., Melnyk M., Denysyuk P. Support of CAD design with cloudbased knowledge management. Proceedings of the XXIV Ukrainian-Polish conference "CAD in machinery design. Implementation and educational issues" CADMD'2016, Lviv, Ukraine, 21-22 October. 2016. P. 77.
- Melnyk M., Lobur M., Kernytskyy A., Szermer M., Zajac P., Zabierowski W. Study of characteristics of MEMS thermo-electric actuators. Proceedings of Xth Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2014, Lviv, Ukraine, 22-24 June. 2014. P. 39–41.
- 61. P. Zajac, M. Szermer, W. Zabierowski, M. Melnyk, O. Matviykiv, A. Napieralski, M. Lobur, C. Maj. Study of dynamic thermal phenomena during readout of uncooled titanium-based microbolometer. Proceedings of IXth Intern. conf. on the perspective technologies and methods in MEMS design MEMSTECH 2013, Polyana, Ukraine, 16-20 April. 2013. P. 40–42.

- Teslyuk V., Melnyk M., Kernytskyy A., Zajac P., Szermer M., Zabierowski W. Subsystem for the computer-aided thermo-actuator design // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design : proceedings of VIIIth International Conference MEMSTECH 2012, Polyana, Ukraine, 18-21 April, 2012. P. 197–200.
- 63. Melnyk M., Kernytskyy A. Modification of image background search algorithm. Proceeding of the XX Ukrainian-Polish conference "CAD in machinery design. Implementation and educational issues". CADMD'2012 Lviv, Ukraine, 11-13 October. 2012. P. 108-111.
- 64. Melnyk M., Kernytskyy A., Łukaszewicz A. Development of pattern stabilization algorithm Proceeding of the XX Ukrainian-Polish conference "CAD in machinery design. Implementation and educational issues". CADMD'2012 Lviv, Ukraine, 11-13 October. 2012. P. 101-104.
- 65. Маркелов О. Е., Мельник М. Р., Косовський В. М. Систематизований огляд програмних засобів обробки звукових даних // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології : матеріали II Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів ACIT'2012 (Тернопіль, 04-05 травня 2012). – 2012. – С. 121–123.
- 66. C. J. Webb and S. Bilbao, "Computing room acoustics with CUDA 3D FDTD schemes with boundary losses and viscosity," 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Prague, Czech Republic, 2011, P. 317-320, doi: 10.1109/ICASSP.2011.5946404.
- P. S. López, P. Callens and M. Cernak, "A Universal Deep Room Acoustics Estimator," 2021 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA), New Paltz, NY, USA, 2021, P. 356-360, doi: 10.1109/WASPAA52581.2021.9632738.
- Y. Luo and W. Kim, "Fast Source-Room-Receiver Acoustics Modeling," 2020 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Amsterdam, Netherlands, 2021, P. 51-55, doi: 10.23919/Eusipco47968.2020.9287377.

- E. De Sena, N. Antonello, M. Moonen and T. van Waterschoot, "On the Modeling of Rectangular Geometries in Room Acoustic Simulations," in IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 23, no. 4, P. 774-786, April 2015, doi: 10.1109/TASLP.2015.2405476.
- 70. C. Spa, A. Rey and E. Hernández, "A GPU Implementation of an Explicit Compact FDTD Algorithm with a Digital Impedance Filter for Room Acoustics Applications," in IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 23, no. 8, P. 1368-1380, Aug. 2015, doi: 10.1109/TASLP.2015.2434212.
- J. Botts and L. Savioja, "Spectral and Pseudospectral Properties of Finite Difference Models Used in Audio and Room Acoustics," in IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 22, no. 9, P. 1403-1412, Sept. 2014, doi: 10.1109/TASLP.2014.2332045.
- K. MacWilliam, F. Elvander and T. v. Waterschoot, "Simultaneous Acoustic Echo Sorting and 3-D Room Geometry Inference," ICASSP 2023 - 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Rhodes Island, Greece, 2023, P. 1-5, doi: 10.1109/ICASSP49357.2023.10096005.
- M. Cosnefroy, S. Guðjónsson and F. Pind, "Physically accurate binaural reproductions from broadband wave-based room acoustics simulations, and comparison with measurements," 2023 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA), Bologna, Italy, 2023, P. 1-7, doi: 10.1109/I3DA57090.2023.10289312.
- 74. R. Yan, C. Van Tonder and L. Tronchin, "Measurements of Room Acoustics with Two Different Methods - A Case Study," 2023 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA), Bologna, Italy, 2023, P. 1-4, doi: 10.1109/I3DA57090.2023.10289298.
- V. Sedlak, D. Durackova and T. Kovacik, "Investigation of an impact of room acoustics on performance of ideal binary mask," 2014 ELEKTRO, Rajecke Teplice, Slovakia, 2014, P. 90-93, doi: 10.1109/ELEKTRO.2014.6847878.

- 76. I. de Bort, J. A. P. y Miño and B. Beckers, "From Concert Halls to City Streets: Bridging the Gap Between Room Acoustics and Urban Acoustics," 2023 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA), Bologna, Italy, 2023, P. 1-7, doi: 10.1109/I3DA57090.2023.10289459.
- P. Z. Kozlowski, "How to Adjust Room Acoustics to Multifunctional Use at Music Venues," 2018 Joint Conference - Acoustics, Ustka, Poland, 2018, P. 1-6, doi: 10.1109/ACOUSTICS.2018.8502383.
- 78. T. C. Lawin-Ore and S. Doclo, "Using statistical room acoustics for analysing the output SNR of the MWF in acoustic sensor networks," 2012 Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Bucharest, Romania, 2012, P. 1259-1263.
- M. R. Kamble and H. A. Patil, "The Impact of Room Acoustics on Replay Speech Signal," 2022 13th International Symposium on Chinese Spoken Language Processing (ISCSLP), Singapore, Singapore, 2022, P. 105-109, doi: 10.1109/ISCSLP57327.2022.10038148.
- F. F. Li, "Intelligent and adaptive acoustics in buildings via blind room acosutic parameter estimation," 2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology, Chengdu, China, 2010, P. V3-663-V3-666, doi: 10.1109/ICCET.2010.5485761.
- C. Zheng, C. Hofmann, X. Li and W. Kellermann, "Analysis of Additional Stable Gain by Frequency Shifting for Acoustic Feedback Suppression using Statistical Room Acoustics," in IEEE Signal Processing Letters, vol. 23, no. 1, P. 159-163, Jan. 2016, doi: 10.1109/LSP.2015.2507205.
- 82. M. Unoki, T. Ikeda, K. Sasaki, R. Miyauchi, M. Akagi and N. S. Kim, "Blind method of estimating speech transmission index in room acoustics based on concept of modulation transfer function," 2013 IEEE China Summit and International Conference on Signal and Information Processing, Beijing, China, 2013, P. 308-312, doi: 10.1109/ChinaSIP.2013.6625350.
- 83. T. Nakatani, T. Yoshioka, K. Kinoshita, M. Miyoshi and B. -H. Juang, "Realtime speech enhancement in noisy reverberant multi-talker environments

based on a location-independent room acoustics model," 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Taipei, Taiwan, 2009, P. 137-140, doi: 10.1109/ICASSP.2009.4959539.

- Y. Ban, X. Li, X. Alameda-Pineda, L. Girin and R. Horaud, "Accounting for Room Acoustics in Audio-Visual Multi-Speaker Tracking," 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Calgary, AB, Canada, 2018, P. 6553-6557, doi: 10.1109/ICASSP.2018.8462100.
- 85. M. R. P. Thomas, I. J. Tashev, F. Lim and P. A. Naylor, "Optimal beamforming as a time domain equalization problem with application to room acoustics," 2014 14th International Workshop on Acoustic Signal Enhancement (IWAENC), Juan-les-Pins, France, 2014, P. 75-79, doi: 10.1109/IWAENC.2014.6953341.
- 86. J. Zhang, W. Zhang, J. A. Zhang, T. D. Abhayapala and L. Zhang, "Spatial Active Noise Control in Rooms Using Higher Order Sources," in IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 29, P. 3577-3591, 2021, doi: 10.1109/TASLP.2021.3126936.
- 87. A. Prodeus et al., "Subjective Assessment of the Influence of Room Characteristics on Intelligibility of Noised Speech," 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 2019, P. 449-453, doi: 10.1109/ELNANO.2019.8783250.
- A. Milo, J. F. Einarsson, Ú. Einarsson and F. Pind, "Treble Auralizer: a real time Web Audio Engine enabling 3DoF auralization of simulated room acoustics designs," 2023 Immersive and 3D Audio: from Architecture to Automotive (I3DA), Bologna, Italy, 2023, P. 1-8, doi: 10.1109/I3DA57090.2023.10289386.
- 89. T. van Waterschoot and M. Moonen, "Distributed estimation and equalization of room acoustics in a wireless acoustic sensor network," 2012 Proceedings of the 20th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Bucharest, Romania, 2012, P. 2709-2713.

- C. Liguori, A. Paolillo, A. Ruggiero and D. Russo, "Towards the evaluation of the measurement uncertainty of environmental acoustic noise," 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, Pisa, Italy, 2015, P. 1238-1242, doi: 10.1109/I2MTC.2015.7151450.
- 91. D. Mašović and M. Öğüç, "Low frequency measurements in building acoustics Analysis of reverberation time field Measurement results," 2012
  20th Telecommunications Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2012, P. 1228-1231, doi: 10.1109/TELFOR.2012.6419437.
- R. Bolejko, A. Dobrucki and P. Plaskota, "Design of Acoustic Chamber for Loudspeaker Measurements," 2018 Joint Conference - Acoustics, Ustka, Poland, 2018, P. 1-4, doi: 10.1109/ACOUSTICS.2018.8502394.
- 93. A. V. Bogomolov, V. N. Zinkin, S. P. Dragan and E. V. Larkin, "Analysis of the Uncertainty of Acoustic Measurements at Various Angles of Incidence of Acoustic Waves on a Measuring Microphone," 2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM), St. Petersburg, Russia, 2020, P. 214-217, doi: 10.1109/SCM50615.2020.9198761.
- 94. V. Didkovskyi, O. Korzhyk, S. Kozeruk, A. Kozak, R. Kostiuk and S. Liakhevych, "Noise Measurement of the Multicopter UAV," 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), Kiev, Ukraine, 2019, P. 67-70, doi: 10.1109/APUAVD47061.2019.8943922.
- 95. A. Homton et al., "Development of the hearing aid measurement system," The 6th 2013 Biomedical Engineering International Conference, Amphur Muang, Thailand, 2013, P. 1-5, doi: 10.1109/BMEiCon.2013.6687643.
- 96. W. Wang, Y. Chen, S. Wang and L. Yang, "Research on Measurement Method of Underwater Transducer Acoustic Field Based on Laser Reflection Tomography," 2021 OES China Ocean Acoustics (COA), Harbin, China, 2021, P. 256-260, doi: 10.1109/COA50123.2021.9520020.

- 97. D. Zheng, M. Zhai and J. Hu, "Study on the measurement method of wet gas flow velocity by ultrasonic flow meter," 2021 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Glasgow, United Kingdom, 2021, P. 1-6, doi: 10.1109/I2MTC50364.2021.9459885.
- X. Zhuang, Y. Zhang and Y. Guo, "An experimental investigation of high frequency acoustic temperature measurement," 2017 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), Xiamen, China, 2017, P. 1-4, doi: 10.1109/ICSPCC.2017.8242427.
- 99. H. Zhao et al., "Direct Measurement of Underwater Sound Velocity via Dual-Comb System and Matched Filtering Algorithm," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 72, P. 1-10, 2023, Art no. 1007210, doi: 10.1109/TIM.2023.3293552.
- 100. X. Shi, C. Tan, H. Wu and F. Dong, "An Electrical and Ultrasonic Doppler System for Industrial Multiphase Flow Measurement," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, P. 1-13, 2021, Art no. 7500313, doi: 10.1109/TIM.2020.3013080.
- 101. L. Yang, J. Zhang and J. Wang, "Sound Speed Measurement Using Phase Estimation Method of Pulse Signal in Water," 2021 OES China Ocean Acoustics (COA), Harbin, China, 2021, P. 267-271, doi: 10.1109/COA50123.2021.9519875.
- 102. Zu Wen Qian et al., "Acoustic radiation force on object and power measurements of focusing source (HIFU)," 2008 IEEE Ultrasonics Symposium, Beijing, China, 2008, P. 1793-1796, doi: 10.1109/ULTSYM.2008.0440.
- 103. Ł. Gorazd, K. Kolber, A. Snakowska and J. Jurkiewicz, "Analysis of Some of the In-Duct Acoustic Pressure Measurement Errors," 2018 Joint Conference -Acoustics, Ustka, Poland, 2018, P. 1-6, doi: 10.1109/ACOUSTICS.2018.8502307.

- 104. X. Aoxuan, C. Yonggang, W. Yuebing and Z. Huifeng, "Design and fabrication of novel sensor for high pressure measurement of acoustic wave,"
  2019 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), Changsha, China, 2019, P. 1664-1669, doi: 10.1109/ICEMI46757.2019.9101691.
- 105. M. Tortello, A. S. Gliozzi, A. Di Bella, C. Mechri, M. Bentahar and M. Scalerandi, "Nonlinear acoustics measurements of intact and damaged samples: fast and slow dynamics," 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, UK, 2019, P. 162-165, doi: 10.1109/ULTSYM.2019.8926141.
- 106. M. Gazivoda, D. Oletic, V. Bilas and C. Trigona, "Measurement of Weak Signal Energy at Acoustic Frequencies by using RMSHI as a Passive Conditioning Circuit," 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Auckland, New Zealand, 2019, P. 1-5, doi: 10.1109/I2MTC.2019.8827042.
- 107. Y. A. Titchenko, V. Y. Karaev, M. S. Ryabkova, M. A. Panfilova and E. M. Meshkov, "Sub-satellite validation using ultrasonic wave gauge: In-situ measurements of surface waves slope variance and other parameters of surface waves," OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey, Monterey, CA, USA, 2016, P. 1-5, doi: 10.1109/OCEANS.2016.7761373.
- 108. Y. Yan, X. Chen, B. Zhong, H. Xu and F. Niu, "The inspection system for hearing aids in situ working condition," 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Tianjin, China, 2014, P. 1607-1612, doi: 10.1109/ICMA.2014.6885940.
- 109. B. Wang, W. Shi, B. Zhao and J. Tan, "Air-Coupled Ultrasonic Lamb Wave In Situ Stress Measurement Method for Composite Plates," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 72, P. 1-10, 2023, Art no. 6008910, doi: 10.1109/TIM.2023.3295021.
- 110. T. Winton, "Quantifying shallow-buried maritime archaeological material using SBP acoustics: Experimental and in-situ wrecksite survey approaches,"

2017 IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics), Rio de Janeiro, Brazil, 2017, P. 1-6, doi: 10.1109/RIOAcoustics.2017.8349722.

- J. Yuan, H. Yu, H. Yan, L. Xu and G. Li, "Development of a deep-sea multimode acoustic sediments in situ measurement system," OCEANS 2016 -Shanghai, Shanghai, China, 2016, P. 1-4, doi: 10.1109/OCEANSAP.2016.7485627.
- 112. Y. -M. Jiang, A. Alvarez, D. Cecchi, B. Garau and M. Micheli, "In-situ acoustic received level measurements with glider based reactive behaviour," OCEANS 2015 Genova, Genova, Italy, 2015, P. 1-6, doi: 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271457.
- 113. M. Zambra et al., "Learning-Based Temporal Estimation of In-Situ Wind Speed From Underwater Passive Acoustics," in IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 48, no. 4, P. 1215-1225, Oct. 2023, doi: 10.1109/JOE.2023.3288970.
- 114. B. Fan, L. Wang, Y. Liu, S. Feng, Z. Wang and X. Zhen, "In Situ Sensing Method for Detecting Wear Particles in Lubricating Grease Based on Ultrasonic Scattering," in IEEE Sensors Journal, vol. 23, no. 24, P. 30143-30153, 15 Dec.15, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3327794.
- 115. G. Li, G. Han, G. Kan and B. Liu, "Upgrading and experimentation of the hydraulic-driven in-situ sediment acoustic measurement system," 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics (COA), Harbin, China, 2016, P. 1-4, doi: 10.1109/COA.2016.7535619.
- 116. A. W. D. Jongens, "Application of cepstrum techniques to the measurement of the normal incident sound absorption coefficient of road surfaces in-situ," 1993 IEEE South African Symposium on Communications and Signal Processing, Gauteng, South Africa, 1993, P. 25-31, doi: 10.1109/COMSIG.1993.365879.
- 117. H. Chen and X. Tong, "Establishment of in-situ ultrasonic-rebound strength curve for nondestructive testing of concrete structure," 2011 International

Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE), Lushan, China, 2011, P. 303-306, doi: 10.1109/ICETCE.2011.5776153.

- 118. J. Simon et al., "Notice of Removal: Imaging in situ human kidney stones with the color Doppler ultrasound twinkling artifact," 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Washington, DC, USA, 2017, P. 1-1, doi: 10.1109/ULTSYM.2017.8092599.
- B. Tallon, T. Brunet and J. H. Page, "In situ search for 3D Anderson localization of ultrasound in resonant emulsions," 2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS), Espoo, Finland, 2016, P. 262-264, doi: 10.1109/URSI-EMTS.2016.7571369.
- A. Noufid and S. Belattar, "Diagnosis on concrete structures in-situ with nondestructive testing: Sonic auscultation & rebond hammer," 2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), Marrakech & Bengrir, Morocco, 2016, P. 1-4, doi: 10.1109/CISTEM.2016.8066793.
- 121. K. Iwanabe, K. Nakadozono, Y. Senda and T. Asano, "Room-temperature ultrasonic-bonding characteristics of compliant micro-bump investigated by ex-situ and in-situ measurements," 2015 IEEE 17th Electronics Packaging and Technology Conference (EPTC), Singapore, 2015, P. 1-5, doi: 10.1109/EPTC.2015.7412363.
- 122. D. P. Williams, A. Vermeij, F. Baralli, J. Groen and W. L. J. Fox, "In situ AUV survey adaptation using through-the-sensor sonar data," 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Kyoto, Japan, 2012, P. 2525-2528, doi: 10.1109/ICASSP.2012.6288430.
- 123. Y. Dongsen and Z. Yingjie, "In-situ monitoring of selective laser melting based on heterogeneous integration of acoustic signals and images," 2021 6th International Conference on Communication, Image and Signal Processing (CCISP), Chengdu, China, 2021, P. 420-424, doi: 10.1109/CCISP52774.2021.9639261.

- 124. S. M. Nichols and D. L. Bradley, "In Situ Shape Estimation of Triangular Moored Hydrophone Arrays Using Ambient Signals," in IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 42, no. 4, P. 923-935, Oct. 2017, doi: 10.1109/JOE.2016.2625378.
- 125. K. Iwanabe, K. Nakadozono, M. Sakamoto and T. Asano, "Dynamic Strain of Ultrasonic Cu and Au Ball Bonding Measured In-Situ by Using Silicon Piezoresistive Sensor," 2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Orlando, FL, USA, 2017, P. 1786-1792, doi: 10.1109/ECTC.2017.316.
- 126. K. Iwanabe, K. Nakadozono, Y. Senda and T. Asano, "In-situ strain measurement of ultrasonic ball bonding," 2016 6th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), Grenoble, France, 2016, P. 1-3, doi: 10.1109/ESTC.2016.7764689.
- 127. A. Rahman, "The effect of in-situ underwater acoustic speed on localization of submerged sensors," Proceeding of IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks 2014, Sydney, NSW, Australia, 2014, P. 1-2, doi: 10.1109/WoWMoM.2014.6918936.
- 128. A. C. Karloff, A. M. Chertov, J. Kocimski, P. Kustron and R. G. Maev, "New developments for in situ ultrasonic measurement of transient temperature distributions at the tip of a copper resistance spot weld electrode," 2010 IEEE International Ultrasonics Symposium, San Diego, CA, USA, 2010, P. 1424-1427, doi: 10.1109/ULTSYM.2010.5935771.
- J. Dillon and S. -M. Steele, "In Situ Array Calibration for Synthetic Aperture Sonar," Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast, Biloxi, MS, USA, 2020, P. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF38699.2020.9389233.
- 130. T. Imaizumi et al., "Observation of in situ tuna behavior around the fisheries aggregating devises (FADs) by using passive and active acoustic methods,"
  2013 IEEE International Underwater Technology Symposium (UT), Tokyo, Japan, 2013, P. 1-4, doi: 10.1109/UT.2013.6519877.

- 131. P. -M. Lee et al., "An in-situ method for the correction of initial position error of an autonomous underwater vehicle near sea floor," 2011 IEEE Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies, Tokyo, Japan, 2011, P. 1-6, doi: 10.1109/UT.2011.5774108.
- 132. S. Gopi, V. P. Felix, S. Sebastian, V. Pallayil and S. Kuselan, "In-situ nonacoustic noise measurement system for towed hydrophone array," 2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings, Austin, TX, USA, 2010, P. 913-916, doi: 10.1109/IMTC.2010.5488241.
- 133. Y. M. Peng et al., "Estimation and compensation of in-situ ultrasound intensity using a 2-D array therapy system and high frame rate imaging," 2017 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Washington, DC, USA, 2017, P. 1-4, doi: 10.1109/ULTSYM.2017.8091822.
- 134. S. Jeganathan, E. Budziszewski, C. Hernandez, P. Bielecki, M. C. Kolios and A. A. Exner, "Ultrasound-Enhanced Distribution and Treatment Efficacy of Dox-Loaded Intratumoral In Situ Forming Implants in Murine HCT-15 Tumors," 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Kobe, Japan, 2018, P. 1-4, doi: 10.1109/ULTSYM.2018.8580108.
- 135. Zhang, L. -j. Xu and Z. -g. Kong, "Design and simulation of rigidly mounted acoustic vector sensor," 2015 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA), Jinan, China, 2015, P. 299-303, doi: 10.1109/SPAWDA.2015.7364494.
- 136. Jinping Li, Lijie Chen, Zhanjiang Gong, Shi Xin and Meng Hong, "A lownoise MEMS acoustic vector sensor," 2013 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM), Harbin, China, 2013, P. 121-124, doi: 10.1109/ICoOM.2013.6626506.
- 137. J. Scott and K. E. Pennington, "Acoustic Vector-Corrected Impedance Meter," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 63, no. 12, P. 2726-2732, Dec. 2014, doi: 10.1109/TIM.2014.2327474.

- 138. S. Shi, C. Wang, B. Hu and Y. Li, "Measurement of the Acoustic Reflection Coefficient of Materials Based on Signal Subspace Decomposition Using a Single Vector Hydrophone," in IEEE Access, vol. 8, P. 3718-3727, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2963217.
- 139. M. De Dominicis, F. Giannini, E. Limiti and G. Saggio, "A novel impedance pattern for fast noise measurements," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 51, no. 3, P. 560-564, June 2002, doi: 10.1109/TIM.2002.1017728.
- N. A. Djuzhev, D. V. Novikov, G. D. Demin, A. I. Ovodov and V. T. Ryabov, "An experimental study on MEMS-based gas flow sensor for wide range flow measurements," 2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Seoul, Korea (South), 2018, P. 1-4, doi: 10.1109/SAS.2018.8336727.
- 141. C. Wu et al., "Development of Gas Meter based on MEMS Thermal Flow Sensor," 2019 IEEE 14th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), Bangkok, Thailand, 2019, P. 192-195, doi: 10.1109/NEMS.2019.8915641.
- 142. R. D. Garrick, L. Villasmil, J. Lee and J. S. Gutterman, "Comparison of new ultrasonic and hot wire thermo-anemometer gas flow meters," 2011 Future of Instrumentation International Workshop (FIIW) Proceedings, Oak Ridge, TN, USA, 2011, P. 164-167, doi: 10.1109/FIIW.2011.6476810.
- I. Eichhorn, G. Dumstorff and W. Lang, "MEMS-based Thermal Flow Sensor System for High Ambient Temperatures," Sensors and Measuring Systems; 19th ITG/GMA-Symposium, Nuremberg, Germany, 2018, P. 1-4.
- 144. S. Dong, S. Duan, Q. Yang, J. Zhang, G. Li and R. Tao, "MEMS-Based Smart Gas Metering for Internet of Things," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, no. 5, P. 1296-1303, Oct. 2017, doi: 10.1109/JIOT.2017.2676678.
- 145. Y. V. Yaghmourali, H. Tavakoli and E. A. Sani, "Design and simulation of a micromachined membrane flow-meter," 2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Shiraz, Iran, 2016, P. 828-831, doi: 10.1109/IranianCEE.2016.7585634.

- 146. E. AbbaspourSani and D. Javan, "Optimization of the Temperature Sensor Position for MEMS Gas Flow Meters," 2006 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics, Kuala Lumpur, Malaysia, 2006, P. 1-3, doi: 10.1109/SMELEC.2006.381008.
- 147. Y. Wu110 and S. Yao, "MEMS thermal mass flow meter with double-heater structure," 2011 IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits, Tianjin, China, 2011, P. 1-2, doi: 10.1109/EDSSC.2011.6117606.
- 148. S. Asadi, A. A. Mokhtari, A. A. Suratgar, E. Khodabandeh and A. Karimi, "A novel two-phased flow meter design using MEMS pressure meters array," The 3rd International Conference on Control, Instrumentation, and Automation, Tehran, Iran, 2013, P. 89-94, doi: 10.1109/ICCIAutom.2013.6912814.
- 149. F. Davignon, O. Basset, G. Gimenez and W. Mai, "A multi-parametric segmentation tool dedicated to ultrasonic data," 2002 IEEE Ultrasonics Symposium, 2002. Proceedings., Munich, Germany, 2002, P. 1761-1764 vol.2, doi: 10.1109/ULTSYM.2002.1192639.
- 150. M. Demarte, R. Nardini, M. Marro, C. Peluso and R. Ivaldi, "A multiparametric method for the classification of the seabed from acoustic backscattered signal," 2018 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea), Bari, Italy, 2018, P. 150-155, doi: 10.1109/MetroSea.2018.8657867.
- 151. Y. Saijo, J. Shikama, K. Yoshida, R. Nagaoka, M. Arakawa and K. Kobayashi, "Multiparametric characterization of a single cell by an ultrasound and optical combined microscope," 2014 IEEE International Ultrasonics Symposium, Chicago, IL, USA, 2014, P. 727-730, doi: 10.1109/ULTSYM.2014.0179.
- 152. D. C. Morris et al., "Multiparametric Ultrasound for the Targeting of Prostate Cancer using ARFI, SWEI, B-mode, and QUS," 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Glasgow, UK, 2019, P. 880-883, doi: 10.1109/ULTSYM.2019.8926035.

- 153. D. C. Morris et al., "Correlation Between 3D ARFI and Quantitative Imaging Metrics from SWEI and Multi-Parametric MRI in Vivo in Normal and Cancerous Prostate Tissue," 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Kobe, Japan, 2018, P. 1-4, doi: 10.1109/ULTSYM.2018.8579729.
- 154. D. Y. Chan et al., "Evaluating Image Quality Improvement in Multiparametric Ultrasound Imaging of Prostate Cancer by Combining ARFI, SWEI, B-mode, and QUS," 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Las Vegas, NV, USA, 2020, P. 1-4, doi: 10.1109/IUS46767.2020.9251796.
- 155. Y. Yan et al., "Multi-parametric acoustic imaging of cervix for more accurate detection of patients at risk of preterm birth," 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Kobe, Japan, 2018, P. 1-4, doi: 10.1109/ULTSYM.2018.8580030.
- 156. D. Nunes, P. Carvalho, J. Henriques and T. Rocha, "Multiparametric prediction with application to early detection of cardiovascular events," 2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI), Modena, Italy, 2017, P. 1-4, doi: 10.1109/RTSI.2017.8065978.
- 157. M. Meziri et al., "Multiparametric study to identify the hepatic fibrosis stages," 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, Rome, Italy, 2009, P. 2236-2239, doi: 10.1109/ULTSYM.2009.5441625.
- 158. G. Guhr, R. Brünig, H. Schmidt, M. Weihnacht, S. Gehrisch and G. Siegert, "Surface acoustic wave resonators as novel tools for multiparametric blood analysis," 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, Buenos Aires, Argentina, 2010, P. 3499-3502, doi: 10.1109/IEMBS.2010.5627792.
- 159. A. Cameron et al., "Multiparametric MRI prostate cancer analysis via a hybrid morphological-textural model," 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Chicago, IL, USA, 2014, P. 3357-3360, doi: 10.1109/EMBC.2014.6944342.

- 160. G. Soloperto et al., "Multiparametric Evaluation of the Acoustic Behavior of Halloysite Nanotubes for Medical Echographic Image Enhancement," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 63, no. 6, P. 1423-1430, June 2014, doi: 10.1109/TIM.2013.2287797.
- T. P. Exarchos et al., "Multiparametric data analysis for diagnostic decision support in balance disorders," 2016 IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics (BHI), Las Vegas, NV, USA, 2016, P. 437-440, doi: 10.1109/BHI.2016.7455928.
- 162. L. Verde, G. De Pietro, M. Alrashoud, A. Ghoneim, K. N. Al-Mutib and G. Sannino, "Dysphonia Detection Index (DDI): A New Multi-Parametric Marker to Evaluate Voice Quality," in IEEE Access, vol. 7, P. 55689-55697, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2913444.
- 163. F. Liu, A. N. Nordin and I. Voiculescu, "Multiparametric MEMS biosensor for cell culture monitoring," 2013 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), Barcelona, Spain, 2013, P. 1-5.
- 164. I. Castro-Hurtado, I. Ayerdi, E. Castaño, A. M. Gutiérrez and J. R. Arraibi, "Microsensors for the multiparametric analysis of natural gas quality," 2015 10th Spanish Conference on Electron Devices (CDE), Aranjuez - Madrid, Spain, 2015, P. 1-4, doi: 10.1109/CDE.2015.7087482.
- 165. M. Arii, H. Yamada, H. Sakamoto and S. Kojima, "Sensitivity Study of X-Band Multiparametric SAR Data From Cabbage Fields," in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, P. 1-11, 2022, Art no. 5203611, doi: 10.1109/TGRS.2021.3063790.
- 166. A. V. Belikov, I. S. Klochkov, I. V. Alekseev and S. A. Kapralov, "Investigation of the polymeric thin films deposed on the surfaces of optical elements using the laser multiparametric method," 2022 International Conference Laser Optics (ICLO), Saint Petersburg, Russian Federation, 2022, P. 1-1, doi: 10.1109/ICLO54117.2022.9840143.
- 167. Z. Guo, R. Xie, Q. Ma, L. Yang, W. Wei and S. Mei, "Impact of Storage and Transmission Line Capacity on the Curtailment of a Remote Renewable Plant:
A Multiparametric Programming Method," 2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), Chengdu, China, 2020,P. 489-492, doi: 10.1109/ICPES51309.2020.9349713.

- A. A. Soshnikov, E. V. Titov and I. E. Migalev, "Using Multiparametric Control System to Choose Electromagnetic Radiation Protection Measures," 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2019, P. 1-6, doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8743041.
- 169. D. Y. Chan et al., "Deep neural network for multiparametric ultrasound imaging of prostate cancer," 2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Xi'an, China, 2021, P. 1-4, doi: 10.1109/IUS52206.2021.9593332.
- P. Chen, M. Calis, H. Wijkstra, P. Huang, B. Hunyadi and M. Mischi, "Multiparametric ultrasound and machine learning for prostate cancer localization," 2022 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Belgrade, Serbia, 2022, P. 907-911, doi: 10.23919/EUSIPCO55093.2022.9909729.
- 171. S. Bilbao and B. Hamilton, "Directional source modeling in wave-based room acoustics simulation," 2017 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA), New Paltz, NY, USA, 2017, P. 121-125, doi: 10.1109/WASPAA.2017.8170007.
- 172. D. Necsulescu, W. Zhang, W. Weiss and J. Sasiadek, "Room Acoustics Measurement System Design using Simulation," 2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, Sorrento, Italy, 2006, P. 1457-1461, doi: 10.1109/IMTC.2006.328638.
- 173. S. Bilbao, "Modeling of Complex Geometries and Boundary Conditions in Finite Difference/Finite Volume Time Domain Room Acoustics Simulation," in IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 21, no. 7, P. 1524-1533, July 2013, doi: 10.1109/TASL.2013.2256897.
- 174. O. Das and E. De Sena, "The Complex Image Method for Simulating Wave Scattering in Room Acoustics," 2023 Immersive and 3D Audio: from

Architecture to Automotive (I3DA), Bologna, Italy, 2023, P. 1-7, doi: 10.1109/I3DA57090.2023.10289275.

- 175. R. -A. Cioaca and D. Stefanoiu, "Simulating Acoustics of a Room Using MATLAB," 2019 22nd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS), Bucharest, Romania, 2019, P. 103-106, doi: 10.1109/CSCS.2019.00025.
- 176. K. Kowalczyk and M. van Walstijn, "Room Acoustics Simulation Using 3-D Compact Explicit FDTD Schemes," in IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 19, no. 1, P. 34-46, Jan. 2011, doi: 10.1109/TASL.2010.2045179.
- 177. E. Accolti, J. Gimenez and M. Vorländer, "Uncertainties of Room Acoustics Simulation Due to Directivity Data of Musical Instruments," in IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 32, P. 300-309, 2024, doi: 10.1109/TASLP.2023.3330117.
- 178. S. Bilbao, B. Hamilton, J. Botts and L. Savioja, "Finite Volume Time Domain Acoustics Simulation under General Room Impedance Boundary Conditions," in IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language vol. 161-173, Processing, 24, no. 1, P. Jan. 2016, doi: 10.1109/TASLP.2015.2500018.
- I. Dokmanić, Y. M. Lu and M. Vetterli, "Can one hear the shape of a room: The 2-D polygonal case," 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Prague, Czech Republic, 2011, P. 321-324, doi: 10.1109/ICASSP.2011.5946405.
- 180. J. Le Besnerais et al., "Multiphysics Modeling: Electro-Vibro-Acoustics and Heat Transfer of PWM-Fed Induction Machines," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 4, P. 1279-1287, April 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2029526.
- 181. W. Thain, "A SPICE Model for Bipolar Junction Transistor Amplifier Design Verification That Uses Specified DC and Small-Signal AC Parameters

Simultaneously," SoutheastCon 2022, Mobile, AL, USA, 2022, P. 355-360, doi: 10.1109/SoutheastCon48659.2022.9763891.

- 182. A. Khawas, F. Muradali, A. Banerjee and S. Mukhopadhyay, "A Top-Down approach to automated generation of high-level SPICE model of Buck Regulator," 2011 Annual IEEE India Conference, Hyderabad, India, 2011, P. 1-6, doi: 10.1109/INDCON.2011.6139629.
- 183. Chong Jian Yee, F. O. Hatem, T. N. Kumar and H. A. F. Almurib, "Compact SPICE modeling of STT-MTJ device," 2015 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD), Kuala Lumpur, Malaysia, 2015, P. 625-628, doi: 10.1109/SCORED.2015.7449413.
- 184. C. He, J. Victory, Y. Xiao, H. D. Vleeschouwer, E. Zheng and Z. Hu, "SiC MOSFET Corner and Statistical SPICE Model Generation," 2020 32nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Vienna, Austria, 2020, P. 154-157, doi: 10.1109/ISPSD46842.2020.9170091.
- 185. G. Wiedemann and R. Schacht, "SPICE model extension to simulate the transient coupled electro-thermal behaviour for several power electronic components on system level - modelling approach and experimental validation," 2022 28th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), Dublin, Ireland, 2022, P. 1-7, doi: 10.1109/THERMINIC57263.2022.9950690.
- 186. K. Sonoda et al., "SPICE Modeling of Piezoelectric Energy Harvesting Device Utilizing Stress Influence," 2013 IEEE International Conference on Green Computing and Communications and IEEE Internet of Things and IEEE Cyber, Physical and Social Computing, Beijing, China, 2013, P. 1662-1664, doi: 10.1109/GreenCom-iThings-CPSCom.2013.302.
- 187. K. Nomura, N. Kikuchi, Y. Watanabe, S. Inoue and Y. Hattori, "Novel SPICE model for common mode choke including complex permeability," 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Long Beach, CA, USA, 2016, P. 3146-3152, doi: 10.1109/APEC.2016.7468314.

- 188. M. Marjanović, A. Prijić, D. Milić and Z. Prijić, "Performance Analysis of Wireless Sensor Network Node Based on Thermoelectric Generator Using SPICE Model," 2023 10th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN), East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2023, P. 1-6, doi: 10.1109/IcETRAN59631.2023.10192212.
- K. Górecki and K. Boguń, "Modelling Properties of Batteries using the SPICE Software," 2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland, 2023, P. 631-634, doi: 10.1109/ACIT58437.2023.10275359.
- 190. D. Biolek, Z. Kolka, V. Biolkova and Z. Biolek, "Memristor models for SPICE simulation of extremely large memristive networks," 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Montreal, QC, Canada, 2016, P. 389-392, doi: 10.1109/ISCAS.2016.7527252.
- 191. S. M. A. B. Mokhtar and W. F. H. Abdullah, "Re-model fabricated memristor behavior in LT-SPICE and applied in logic circuit," 2014 IEEE Symposium on Computer Applications and Industrial Electronics (ISCAIE), Penang, Malaysia, 2014, P. 106-110, doi: 10.1109/ISCAIE.2014.7010219.
- 192. S. M. A. B. Mokhtar and W. F. H. Abdullah, "Memristor-CMOS interfacing circuit SPICE model," 2015 IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE), Langkawi, Malaysia, 2015, P. 147-150, doi: 10.1109/ISCAIE.2015.7298345.
- 193. G. Zhu, Z. Zhang, W. Li and L. Huang, "Drift Speed Adaptive Memristor SPICE Model Implementation and Applications in Logic Circuits," 2022 IEEE 4th International Conference on Circuits and Systems (ICCS), Chengdu, China, 2022, P. 70-75, doi: 10.1109/ICCS56666.2022.9936317.
- 194. W. Lee, J. Park and J. Kim, "Electromagnetic simulations of a neuromorphic hardware using PEEC and memristor SPICE models," 2017 IEEE Electrical Design of Advanced Packaging and Systems Symposium (EDAPS), Haining, China, 2017, P. 1-3, doi: 10.1109/EDAPS.2017.8276969.

- 195. G. Wild and S. Hinckley, "Pspice simulation of an electro-acoustic communications channel," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 57, no. 4, P. 981-985, April 2010, doi: 10.1109/TUFFC.2010.1503.
- 196. S. Pleshkova, K. Panchev and A. Bekyarski, "Developing a Functional Scheme of an IoT Based Module to an Acoustic Sensor Network," 2021 IV International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech), Sofia, Bulgaria, 2021, P. 01-04, doi: 10.1109/HiTech53072.2021.9614207.
- 197. M. Ralchev, V. Mateev and I. Marinova, "IoT System for Electric Discharge Acoustic Spectrum Monitoring," 2021 IV International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech), Sofia, Bulgaria, 2021, P. 01-04, doi: 10.1109/HiTech53072.2021.9614210.
- 198. S. Yang, S. Khan, X. Chuanxi, Z. Yifeng and P. Shengchun, "Design and Realization of a Buoy for Ocean Acoustic Tomography in Coastal Sea based on NB-IoT Technology," OCEANS 2019 - Marseille, Marseille, France, 2019, P. 1-4, doi: 10.1109/OCEANSE.2019.8867230.
- 199. A. Ghimire and A. Badi, "Underwater Acoustic Channel Propagation Module for Simulation of Large-Scale Sub-Aquatic Internet of Things (IoT) Networks in JiST/SWANS," SoutheastCon 2018, St. Petersburg, FL, USA, 2018, P. 1-4, doi: 10.1109/SECON.2018.8479242.
- 200. W. -H. Cho and T. Koukoulas, "Traceablity Chain for Acoustic Sensors Based on the Direct Definition of the Acoustic Pascal by Optical Method," 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, Roma, Italy, 2020, P. 532-536, doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138242.
- 201. S. Kim, K. Choi, J. Cho and D. Park, "Lightweight things-server interaction using acoustic signal distortion detection in IoT applications," 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), Milan, Italy, 2017, P. 66-68, doi: 10.1109/ICUFN.2017.7993749.

- 202. C. Cai, R. Zheng and J. Luo, "Ubiquitous Acoustic Sensing on Commodity IoT Devices: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 24, no. 1, P. 432-454, Firstquarter 2022, doi: 10.1109/COMST.2022.3145856.
- 203. S. Van Goethem, S. Verwulgen, F. Goethijn and J. Steckel, "An IoT solution for measuring bee pollination efficacy," 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Limerick, Ireland, 2019, P. 837-841, doi: 10.1109/WF-IoT.2019.8767298.
- 204. N. Siriphun, S. Kashihara, D. Fall and A. Khurat, "Distinguishing Drone Types Based on Acoustic Wave by IoT Device," 2018 22nd International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC), Chiang Mai, Thailand, 2018, P. 1-4, doi: 10.1109/ICSEC.2018.8712755.
- 205. C. Navya, S. Salvi, N. D. Jacob and S. Kumar, "A ROOF Computing Architecture based Indoor Positioning System for IoT Applications," 2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), Palladam, India, 2020, P. 19-24, doi: 10.1109/I-SMAC49090.2020.9243580.
- 206. Z. Pan et al., "Cognitive Acoustic Analytics Service for Internet of Things,"
  2017 IEEE International Conference on Cognitive Computing (ICCC),
  Honolulu, HI, USA, 2017, P. 96-103, doi: 10.1109/IEEE.ICCC.2017.20.
- 207. D. Gunatilaka, "An IoT-Enabled Acoustic Sensing Platform for Noise Pollution Monitoring," 2021 IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), New York, NY, USA, 2021, P. 0383-0389, doi: 10.1109/UEMCON53757.2021. 9666534.
- 208. M. I. Sayyaf, D. L. Carnì and F. Lamonaca, "Wireless Crack Detection System Based on IoT and Acoustic Emission," 2023 IEEE International Workshop on Metrology for Living Environment (MetroLivEnv), Milano, Italy, 2023, P. 80-84, doi: 10.1109/MetroLivEnv56897.2023.10164053.
- 209. T. Goktas, R. Er, F. Altunel and M. Arkan, "IoT based Multi-Environmental Sensing System: Monitoring of Rotor Fault in Induction Motors," 2023 IEEE

14th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Chania, Greece, 2023, P. 285-290, doi: 10.1109/SDEMPED54949.2023.10271411.

- 210. M. Shaban and A. Abdelgawad, "A study of distributed compressive sensing for the Internet of Things (IoT)," 2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Singapore, 2018, P. 173-178, doi: 10.1109/WF-IoT.2018.8355095.
- 211. J. Kim, H. Oh, W. Choi, M. Song and S. Lee, "Acoustic IoT Framework to Detect Missing Person in Mountainous Areas," 2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), Jeju Island, Korea, Republic of, 2021, P. 1859-1861, doi: 10.1109/ICTC52510.2021.9620818.
- 212. J. Lopez-Ballester, J. Segura, S. Felici and M. Cobos, "An AI-IoT Platform for Psycho-Acoustic Annoyance Assessment on the Edge," 2023 4th International Symposium on the Internet of Sounds, Pisa, Italy, 2023, P. 1-7, doi: 10.1109/IEEECONF59510.2023.10335356.
- 213. M. Jin, Y. He, Y. Liu and X. Wang, "Furtively Connecting IoT Devices with Acoustic Noise," 2022 21st ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), Milano, Italy, 2022, P. 195-207, doi: 10.1109/IPSN54338.2022.00023.
- 214. A. Mukherjee, F. Gazi, N. Pathak and S. Misra, "AquaStream: Multihop Multimedia Streaming Over Acoustic Channel in Severely Resource-Constrained IoT Networks," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 14, P. 12085-12092, 15 July15, 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3133341.
- 215. G. Niro, I. Marasco, F. Rizzi, A. D'Orazio, M. De Vittorio and M. Grande, "Design of a surface acoustic wave resonator for sensing platforms," 2020 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA), Bari, Italy, 2020, P. 1-6, doi: 10.1109/MeMeA49120.2020.9137116.

- 216. G. Yang, J. Zhang, G. Han and Y. Qian, "Full-duplex acoustic communication method for high-traffic multi-hop UACNs," 2021 Computing, Communications and IoT Applications (ComComAp), Shenzhen, China, 2021, P. 248-252, doi: 10.1109/ComComAp53641.2021.9653012.
- 217. S. Hua, J. Jiang and G. Han, "A lightweight Trust Management mechanism based on Conflict Adjudication in Underwater Acoustic Sensor Networks,"
  2021 Computing, Communications and IoT Applications (ComComAp), Shenzhen, China, 2021, P. 258-262, doi: 10.1109/ComComAp53641.2021.9653054.
- 218. C. Takano, S. Fujino, D. Nobayashi, K. Tsukamoto, M. Mizumachi and T. Ikenaga, "Development of a Wireless Communication System for Reliable Acoustic Data Collection Toward Anomaly Detection in Mechanical Equipment," 2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), Las Vegas, NV, USA, 2021, P. 1544-1547, doi: 10.1109/CSCI54926.2021.00300.
- 219. J. Lopez-Ballester, S. Felici-Castell, J. Segura-Garcia and M. Cobos, "AI-IoT Platform for Blind Estimation of Room Acoustic Parameters Based on Deep Neural Networks," in IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 1, P. 855-866, 1 Jan.1, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3203570.
- 220. K. S. Kumar and V. Anand, "Underwater Acoustic Sensor Network: Architecture, Challenges, Future Possibilities In the Perspective of IoT," 2023 Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT), Trichirappalli, India, 2023, P. 1-7, doi: 10.1109/ICEEICT56924.2023.10157956.
- 221. C. Stewart, N. Fough, N. Erdogan and R. Prabhu, "Performance and Energy Modelling for a Low Energy Acoustic Network for the Underwater Internet of Things," 2023 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea; Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea), La Valletta, Malta, 2023, P. 110-115, doi: 10.1109/MetroSea58055.2023.10317266.

- 222. D. Hollosi, G. Nagy, R. Rodigast, S. Goetze and P. Cousin, "Enhancing Wireless Sensor Networks with Acoustic Sensing Technology: Use Cases, Applications & Experiments," 2013 IEEE International Conference on Green Computing and Communications and IEEE Internet of Things and IEEE Cyber, Physical and Social Computing, Beijing, China, 2013, P. 335-342, doi: 10.1109/GreenCom-iThings-CPSCom.2013.75.
- 223. S. Ruiz, T. van Waterschoot and M. Moonen, "Distributed Combined Acoustic Echo Cancellation and Noise Reduction in Wireless Acoustic Sensor and Actuator Networks," in IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, vol. 30, P. 534-547, 2022, doi: 10.1109/TASLP.2022.3140548.
- 224. State-of-the-art Acoustics. Електроннийресурс. Режим доступу: https://www.acousticfields.com/state-of-the-art-acoustics (дата звернення: 03.02.2024). – Назва з екрана.
- 225. Schobben D. W. E. Real-Time Adaptive Concepts in Acoustics.
  Електроннийресурс / D. W. E. Schobben. Dordrecht : Springer Netherlands, 2001. Режим доступу: link.springer.com/book/10.1007/978-94-010-0812-9 (дата звернення: 18.09.2023). Назва з екрана.
- 226. Design With Purpose [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.iands.design/interior-design/technology/article/10168760/ acoustics-and-the-internet-of-things (дата звернення: 14.04.2024). Назва з екрана.
- 227. Pulse frequency [Електронний ресурс] / ScienceDirect. Режим доступу: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pulse-frequency# (дата звернення: 14.04.2024). – Назва з екрана.
- 228. GoogleTranslateЕлектроннийресурс.Режимдоступу:https://translate.google.com/?hl=ru&sl=en&tl=uk&text=sounding&op=translate (дата звернення: 15.07.2023).
- 229. X. Yang et al., "An Augmented Lever Analogy Method for Kinematic Analysis of Dual-Input Planetary/Epicyclic Gear Sets Involving Planet Gear,"

in IEEE Access, vol. 10, P. 101137-101148, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3206845.

- 230. R. Song, Y. Xia and S. Du, "Dynamic Analysis and Modeling of the Natural Gas Pipeline Using the Electrical Analogy," 2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Orlando, FL, USA, 2023, P. 1-5, doi: 10.1109/PESGM52003.2023.10252593.
- 231. S. Fang, L. Shi, B. Yao, X. Li and L. Zhao, "A method of Markov channel modeling for reentry dynamic plasma sheath," 2015 IEEE 6th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE), Shanghai, China, 2015, P. 9-12, doi: 10.1109/MAPE.2015.7510255.
- 232. F. Mady, J. M. Reboul, R. Renoud and J. P. Ganachaud, "Formal analogy between anomalous dispersive transport and dispersion in polarization processes. A physical interpretation of the Cole and Cole formula," *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2004. ICSD 2004.*, Toulouse, France, 2004, P. 133-136 Vol.1, doi: 10.1109/ICSD.2004.1350308.
- 233. M. N. Sarpiri, M. S. Aghaei and T. J. Gandomani, "Towards Better Software Development Effort Estimation with Analogy-based Approach and Nature-Algorithms," 2023 International based Conference on Information P. Technology (ICIT),Amman, Jordan, 2023, 114-117, doi: 10.1109/ICIT58056.2023.10225939.
- 234. Брич М.В., Голяка Р.Л., Марусенкова Т.А., Гельжинський І.І., Мельник М.Р. Системи вбудованої самодіагностики мікроелектронних сенсорних пристроїв: колективна монографія. Львів: «Новий-світ-2000», 2024. 238 с.
- 235. PSpice for TI: PSpice Model of Microphone [Електронний ресурс]. / E2E
   Support Forums. Режим доступу: https://e2e.ti.com/support/
   tools/simulation-hardware-system-design-tools-group/sim-hw-system-design
   /f/simulation-hardware-system-design-tools-forum/994518/pspice-for-ti-

pspice-model-of-microphone (дата звернення: 27.06.2023). – Назва з екрана.

- 236. LTspice model loudspeaker [Електронний ресурс] // Electro Tech Online. Режим доступу: https://www.electro-tech-online.com/threads/ltspice-modelloudspeaker.142634/ (дата звернення: 19.04.2023). – Назва з екрана.
- 237. ТРА2034D1 [Електронний ресурс]. Режим доступу:<br/>https://www.ti.com/product/TPA2034D1#design-tools-simulation (дата<br/>звернення: 09.04.2023). Назва з екрана.
- 238. Biolek D., Biolek Z., Biolková V. SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift [Текст] // Radioengineering. – 2009. – Vol. 18, No. 2. – С. 210– 214.
- 239. Javad Ahmadnejad;Bahram Azizollah Ganji;Arash Nemati. Design, analysis, and modelling of a MEMS capacitive microphone for integration into CMOS circuits // 2013 IEEE Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics and Electronics (PrimeAsia) 2013 DOI: 10.1109/PrimeAsia.2013.6731202
- 240. T. Bieniek;G. Janczyk;M. Ekwińska;T. Budzyński;G. Gluszko;P. Grabiec;A. Kociubiński. Novel methodology for 3D MEMS-IC design and co-simulation on MEMS microphone smart system example // 2014 International 3D Systems Integration Conference (3DIC) 2014 DOI: 10.1109/3DIC.2014.7152184
- 241. Yan Xiong;Qiang Chen;Shuxia Deng;Sheng Liang;Kailian Wang;Jun Zhang;Jie Wang. Model-Based Post Filter for Microphone Array Speech Enhancement // 2018 7th International Conference on Digital Home (ICDH) 2018 DOI: 10.1109/ICDH.2018.00023
- 242. Sina Hafezi;Alastair H. Moore;Patrick A. Naylor. Modelling source directivity in room impulse response simulation for spherical microphone arrays // 2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO) 2015

- 243. Byung-Hun Kim;Hwa-Sun Lee. Acoustical-Thermal Noise in a Capacitive MEMS Microphone // IEEE Sensors Journal 2015 | Volume: 15, Issue: 12 DOI: 10.1109/JSEN.2015.2464372
- 244. Li Hua Xiang;Lian Ming Wang;An Ning Yu. Modeling microphone in PSpice based on Neural Network // 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010) 2010 Volume: 13 DOI: 10.1109/ICCASM.2010.5622642
- 245. PSpice Modeling of a Sandwich Piezoelectric Ceramic Ultrasonic Transducer in Longitudinal Vibration // Sensors. 2017. Vol. 17, No. 10, 2253. 13 c.
- 246. SPICE Model for Lossy Piezoelectric Polymers [Текст] // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2009. Vol. 56, No. 3. С. 1–9. DOI: 10.1109/TUFFC.2009.1048
- 247. Ball I. L. A two-port analogous circuit and SPICE model for Salmon's family of acoustic horns // J. Acoust. Soc. Am. – 1996. – Vol. 99, No. 3. – C. 1259– 1266.
- 248. Kubov Vladimir. Modeling of Piezoelectric and Acoustic Elements with LTspice\SwCad. 2011. 6 c.
- 249. Johansson J. SPICE Modeling of Ultrasound Systems: Improvements and Verifications: Thesis / J. Johansson. – Luleå : Department of Computer Science and Electrical Engineering (EISLAB), 2001. – 77 c.
- 250. Maione E., Tortoli P., Lypacewicz G., Nowicki A., Reid J. M. PSpice Modelling of Ultrasound Transducers: Comparison of Software Models to Experiment // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. – 1999. – Vol. 46, No. 2. – C. 399–406.
- 251. Leach W. M. Computer-aided electroacoustic design with SPICE // Journal of the Audio Engineering Society. – 1991. – Vol. 39, No. 7–8. – C. 551–562.
- 252. Spice Simulation of a Loudspeaker with Thiele Small Parameter [Електронний ресурс]. Режим доступу : https://www.micka.de/en/ (дата звернення: 14.10.2023). Назва з екрана.

- 253. Барило Г.І., Голяка Р.Л., Готра З.Ю. Сигнальні перетворювачі мікроелектронних сенсорів імпедансного типу. – Львів: Ліга-прес, – 2017. 182 с.
- 254. Бойко, О. В., Голяка, Р. Л., Готра, З. Ю. Сигнальні перетворювачі функціонально інтегрованих сенсорів теплових величин. Монографія. Львів: Простір-М. –2018. - 292 с.
- 255. Morse P. Vibration and Sound. New York: McGraw Hill, 1948.
- 256. Stratton J. A. Electromagnetic Theory, Sec. 18. New York: McGraw-Hill, 1941.
- 257. Microflown: A New Category of Sensors. Internoise 2012. 2012. Доступно: https://www.slideshare.net/Microflown. Дата звернення: 10 січня 2024 р.
- 258. M. Guiot, D. F. Comesana, M. Korbasiewicz and G. C. Pousa, "Turbocompressor and piping noise assessment using a particle velocity based sound emission method," Internoise2015, 2015.
- 259. Gibson, L. J., & Ashby, M. F. Cellular Solids: Structure and Properties, 2nd
   Edition. Cambridge University Press, 1997.
   https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326
- 260. Arenas, J.A., & Crocker, M. Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials, 2010, Sound&Vibration 44(7), P. 12-17
- 261. Allard, J., & Atalla, N. Propagation of sound in porous media: modelling sound absorbing materials 2e. John Wiley & Sons, 2009. https://doi.org/10.1002/9780470747339
- 262. Tao, Y., Ren, M., Zhang, H., & Peijs, T. Recent progress in acoustic materials and noise control strategies – A review. Applied materials today, Volume 24, September 2021, 101141. https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101141
- Cao, L., Fu, Q., Si, Y., Ding, B., & Yu, J. Porous materials for sound absorption. Composites Communications, Volume 10, December 2018, P. 25-35. https://doi.org/10.1016/j.coco.2018.05.001

- 264. Xiao-Dan, Z., Yong-Jie, Y., & Yuan-Jun, W. Improving low-frequency sound absorption of micro-perforated panel absorbers by using mechanical impedance plate combined with helmholtz resonators. Applied Acoustics, Volume 114, 15 December 2016, P. 92-98. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.07.013
- 265. Oliva, D., & Hongisto, V. Sound absorption of porous materials-accuracy of prediction methods. Applied Acoustics. Volume 74, Issue 12, December 2013, P. 1473-1479. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.06.004
- 266. Crocker, M. J., Ed., Handbook of Noise and Vibration Control, John Wiley and Sons, New York, 2007.
- Huang, S., Li, Y., Zhu, J., & Tsai D.P. Sound-Absorbing Materials. Physical Review Applied, 2023, 20, 010501.
   https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.20.010501
- Johnson, D. L., Koplik, J., & Dashen, R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. Journal of Fluid Mechanics, 1987; 176, P. 379-402. https://doi.org/10.1017/S0022112087000727
- 269. Doutres, O., Salissou, Y., Atalla, N., & Panneton, R. Evaluation of the Acoustic and Non-Acoustic Properties of Sound Ab-sorbing Materials Using a Three-Microphone Impedance Tube. Applied Acoustics, 2010; 71(6), P. 506-509. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.01.007
- 270. Lafarge, D., Lemarinier, P., & Allard, J. F. Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies. The Journal of the Acoustical Society of America, 1997; 102(4), P. 1995-2006. https://doi.org/10.1121/1.419690
- 271. ISO 10534-1- Acoustics Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes Part 1: Method using standing wave ratio.
- 272. ISO 10534-2 Acoustics Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes Part 2: Transfer-function method.
- 273. ISO 354 Acoustics-Measurement of sound absorption in a reverberation room.

- 274. Vorländer, M. Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality (RWTHedition). Springer Science & Business Media, 2007. https://doi.org/10.1007/978-3-540-48830-9
- 275. Rubacha, J., Pilch, A., & Zastawnik, M. (2012). Measurements of the Sound Absorption Coefficient of Auditorium Seats for Various Geometries of the Samples. Archives of Acoustics, 2012; 37(4), P. 483-488. https://doi.org/10.2478/v10168-012-0060-1
- 276. Cuenca, J., Göransson, P., De Ryck, L., Lähivaara, T. Deterministic and statistical methods for the characterisation of poroelastic media from multiobservation sound absorption measurements. Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 163, 15 January 2022, 108186. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108186
- 277. Delany, M. E., & Bazley, E. N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials. Applied acoustics, 1970; 3(2), P. 105-116. https://doi.org/10.1016/0003-682X(70)90031-9.
- 278. Miki, Y. Acoustical Properties of Porous Materials–Modification of Delany-Bazley Models. Journal of the Acoustical Society of Japan, 1990; 11, P. 19-24. https://doi.org/10.1250/ast.11.19
- 279. Allard, J. F., & Champoux, Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame porous media. Journal of the Acoustical Society of America, 1992; 91(6), P. 3346-3355. https://doi.org/10.1121/1.402824
- 280. Bonfiglio P., Pompoli F.: Inversion Problems for Determining Physical Parameters of Porous Materials: Overview and Comparison Between Different Methods. Acta Acust. united Acust. 99(3), 341–351 (2013). https://doi.org/10.3813/AAA.918616
- 281. Wilson, D. K. A macroscopic model for porous sound-absorbing materials. Journal of the Acoustical Society of America, 1980; 68(6), P. 1734-1740. https://doi.org/10.1121/1.385091

- 282. Cox, T., & d'Antonio, P. Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application (3rd ed.). Crc Press, 2016. https://doi.org/10.1201/9781315369211
- 283. Herrero-Dura, I., Cebrecos, A., Romero-Garcia, V., Garcia-Raff, L. M. Matrix formulation in Acoustics: the Transfer Matrix Method, 2019, Modelling in Science Education and Learning 12(2), P. 153-164. DOI:10.4995/msel.2019.12148
- 284. Dell, A., Krynkin, A., & Horoshenkov, K.V. The use of the transfer matrix method to predict the effective fluid properties of acoustical systems, 2021, Applied Acoustics, 182. 108259. DOI:10.1016/j.apacoust.2021.108259
- 285. Hou, X., Du, S., Liu, L., Guo, J., & Li, Z. A transfer matrix approach for structural–acoustic correspondence analysis of diesel particulate filter, 2017, Advances in Mechanical Engineering, Volume 9, Issue 9. https://doi.org/10.1177/1687814017722495
- 286. Kamisiński, T., Brawata, K., Pilch, A., Rubacha, J., & Zastawnik, M. Sound diffusers with fabric covering. Archives of Acoustics, 2012; 37(3), P. 317-322. https://doi.org/10.2478/v10168-012-0040-5
- 287. ASTM C522-03(2022) Standard Test Method for Airflow Resistance of Acoustical Materials.
- 288. ISO 9053-1:2018 Acoustics Determination of airflow resistance Part 1: Static airflow method.
- Sebaa N., Fellah Z. E. A., Fellah M., Lauriks W., Depollier C., Measuring flow resistivity of porous material via acoustic reflected waves, J. Appl. Phys. 98, 084901 (2005)
- 290. Jeong, C-H. Flow resistivity estimation from practical absorption coefficients of fibrous absorbers. Applied Acoustics. 2020;158. 107014. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107014
- 291. Zea E, Brandão E.; Nolan M.; Cuenca J, Andén J; Svensson U.; Sound absorption estimation of finite porous samples with deep residual learning. J.

Acoust. Soc. Am. 154, 2321–2332 (2023), https://doi.org/10.1121/10.0021333

- 292. Müller-Giebeler M., Marco Berzborn M., Vorländer M.: Free-field method for inverse characterization of finite porous acoustic materials using feed forward neural networks. J. Acoust. Soc. Am. 155, 3900–3914 (2024), https://doi.org/10.1121/10.0026239
- 293. ДСТУ EN 29053:2019 Акустика. Матеріали для акустичних застосовань. Визначення опору повітряного потоку.
- 294. Allan D. Pierce. Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications. Springer Science & Business Media, 2019
- 295. Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders. Fundamentals of Acoustics, 4th Edition, 2000, 560 pages
- 296. David A. Bies, Colin H. Hansen. Engineering Noise Control: Theory and Practice, Fourth Edition 4th Edition, 2009
- 297. Keith Johnson. Acoustic and Auditory Phonetics, 3rd Edition, 2011, Wiley-Blackwell, 232 pages, ISBN: 978-1-444-34308-3
- 298. Steffen Marburg, Bodo Nolte. Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids - Finite and Boundary Element Methods. Springer Science & Business Media, Feb 27, 2008 - Science - 578 pages, DOI:10.1007/978-3-540-77448-8
- 299. David Havelock, Sonoko Kuwano, Michael Vorländer. Handbook of Signal Processing in Acoustics. 2008,
- 300. Thomas D. Rossing. Springer Handbook of Acoustics. 2014
- 301. MSC Nastran 2022.2 High Performance Computing User's Guide. https://helpbe.hexagonmi.com/bundle/MSC\_Nastran\_2022.2\_High\_Performance\_Com puting\_User\_Guide/raw/resource/enus/MSC\_Nastran\_2022.2\_High\_Perfor mance\_Computing\_User\_Guide.pdf
- 302. Liu, Zhengqing; Fard, Mohammad; Jazar, Reza. Development of an acoustic material database for vehicle interior trims. SAE Technical Paper, 2015.

- 303. Тонконогий, В. М.; Синько, И. С.; Корнещук, И. Т. Автоматизированное проектирование помещений со специальными акустическими свойствами // Високі технології в машинобудуванні. - 2015. - № 1. - С. 204-209.
- 304. Sadowski, J., et al. Baza danych o materiałach, wyrobach i ustrojach przeznaczonych do ochrony przed hałasem i drganiami. Bezpieczeństwo Pracy: nauka i praktyka, 2000, 2-7.
- 305. Czyżewski K.: Zadanie 2/SP/93 Banki danych dotyczących zabezpieczeń akustyczno-budowlanych oraz źródeł hałasu w budynkach mieszkalnych (Kierownictwo naukowe: Prof. dr hab. inż. Jerzy Sadowski). Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1993 (Opracowanie autorskie)
- 306. Zadanie 03.9.22 SPR-1 Etap 2. "Opracowanie i przetestowanie systemu informatycznego zawierającego bazę danych o wybranych materiałach, wyrobach i ustrojach przeznaczonych do ochrony przed hałasem i drganiami posiadających aprobaty i certyfikaty krajowe i zagraniczne w tym z krajów Unii Europejskiej. Weryfikacja przez użytkowników" Sprawozdanie z realizacji Etapu II Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa listopad 1999
- 307. ДСТУ Б В.2.7-183:2009 Будівельні матеріали. Матеріали та вироби будівельні звукопоглинальні і звукоізоляційні. Класифікація й загальні технічні вимоги.
- 308. ДБН В.1.1-31:2013 "Захист територій, будинків і споруд від шуму"
- 309. Синько И.С., Молчан Е.Г. Акустические свойства промышленных помещений и зданий многоцелевого назначения. Проблеми техніки. Наук.-вироб. журн. / Одес. нац. мор. ун-т, Хмельн. нац. ун-т. – Одеса, 2014. – №2. – С. 90-96.
- 310. Sadowski, Jerzy. Akustyka w urbanistyce, architekturze i budownictwie. Arkady, 1971.
- 311. Engel, Zbigniew, et al. "Podstawy akustyki obiektów sakralnych."Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Kraków–Radom (2007).

- 312. Васильев А.В., Климков В.А., Продеус А.Н. «Автоматизация акустической экспертизы помещений» Электроника и связь (Електроніка та звязок, укр.), № 5, с. 63-71 (2013).
- 313. Гавриленко А.В., Дидковский В.С., Продеус А.Н. «Комплекс вычислительных программ для моделирования измерений разборчивости речи» Электроника и связь (Електроніка та звязок, укр.), № 6(35), с. 16-24 (2006).
- 314. Beranek, Leo L. "Music, acoustics, and architecture." Bulletin of the American Academy of Arts and Sciences 45.8 (1992): 25-46.
- 315. Powell, Michael James David. Approximation theory and methods. Cambridge university press, 1981.
- 316. Beranek, Leo Leroy, and Tim J. Mellow. Acoustics: sound fields and transducers. Academic Press, 2012.
- 317. Beranek Leo, Daniel W. Martin. "Concert & opera halls: how they sound." The Journal of the Acoustical Society of America 99.5 (1996): 2637-2637.
- 318. Beranek, Leo. Concert halls and opera houses: music, acoustics, and architecture. Springer Science & Business Media, 2012.
- 319. Beranek, Leo L., and Istvan L. Ver. "Noise and vibration control engineering-principles and applications." Noise and vibration control engineering-Principles and applications John Wiley & Sons, Inc., 814 p. 1 (1992).
  320. Beranek, Leo L. "Concert hall acoustics–1992." The Journal of the Acoustical Society of America 92.1 (1992): 1-39.
- 321. Dalenback, B. I. "CATT-Acoustic v9. 0c User's Manual." 2012.
- 322. Dalenbäck, B.I.L. "CATT-Acoustic v9 powered by TUCT use manuals." Computer Aided Theatre Technique 2011.
- 323. Chopra A. Introduction to google sketchup. John Wiley & Sons, 2012.
- 324. Scarpino M. Automatic SketchUp: Creating 3-D models in ruby. Eclipse Engineering LLC, 2010.

- 325. Beranek, L. L., and Hidaka, T. 1998 Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces. The Journal of the Acoustical Society of America, 104(6), 3169-3177.
- 326. Engel, Z., Engel, J., Kosała, K., & Sadowski, J. 2007 Podstawy akustyki obiektów sakralnych. ITE, Kraków.
- 327. Kulowski, A. 2011 Akustyka sal-Zalecenia projektowe dla architektów. Politechnika Gdańska.
- 328. Rettinger, M. (1977). Acoustic Design and Noise Control: Noise control (Vol.2). Chemical Publishing Company.
- 329. Standart ISO 3382-1 2009 Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 1: Performance spaces.
- 330. L. L. Beranek, T. Hidaka: Sound absorption in concert halls by seats, occupied and unoccupied, and by the hall's interior surfaces. J. Acoust. Soc. Am. 104(6), 3169-3177, 1998
- 331. N. Nishihara, T. Hidaka: Mechanism of sound absorption by seated audience in halls. J. Acoust. Soc. Am. 110(5), 2398-2411, 2001
- 332. A. Kulowski: Acoustics rooms Design recommendations for architects.Gdańsk University of Technology Publisher, Gdańsk 2011, (in Polish).
- 333. M. Barron: Auditorium Acoustics and Architectural Design, Publisher E & FN Spon, Londyn 2008
- 334. Standart PN-EN ISO 3382-1 2009 Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part 1: Performance spaces, (in Polish).
- 335. A. Gołas: Computer methods in interior and environment acoustics, AGH publishing houses, Krakow 1995, (in Polish).
- 336. A. Gołas, J. Wierzbicki: Acoustic field digital simulation. Archives of Acoustics. vol 2, 1993.
- 337. T. Kamisinski, R. Kinasz, J. Rubacha, A. Pilch, A. Flach: Acoustic studies of selected materials for the renovation of the interior of the Lviv Opera, Building physics in theory and practice: XII Polish scientific and technical conference Lodz, 2009., conference materials, P. 143-144, , (in Polish).

- 338. Standard, ISO. (1997). 3382. Acoustics–Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. International Standards Organization.
- 339. Champagne, B., Bédard, S., & Stéphenne, A. (1996). Performance of timedelay estimation in the presence of room reverberation. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 4(2), 148-152.
- 340. Eyring, C. F. (1930). Reverberation time in "dead" rooms. The Journal of the Acoustical Society of America, 1(2A), 217-241.
- 341. Carvalho, A. P. O. (1995). The use of the Sabine and Eyring reverberation time equations to churches. The Journal of the Acoustical Society of America, 97(5), 3319-3319.
- 342. Young, R. W. (1959). Sabine reverberation equation and sound power calculations. The Journal of the Acoustical Society of America, 31(7), 912-921.
- 343. ДСТУ EN ISO 3741:2016 Акустика. Визначення рівнів звукової потужності та рівнів звукової енергії джерел шуму за звуковим тиском.
- 344. Wallace Clement Sabine, Collected Papers on Acoustics, New York: Dover Publications, 1964.
- 345. Leo Beranek and Tim Mellow. Acoustics: Sound Fields and Transducers. Elsevier, Oxford, 1st edition, 2012.
- 346. Абракітов В.Е. Багаторазові відбиття звуку в акустичних розрахунках: Монографія. / В.Е. Абракітов. – Харків : Основа, 2007. –244 – 280с
- 347. Богданова Н.В., et al. "Математичне модулювання огинаючої ревербераційного процесу за допомогою алгоритму Шредера." Адаптивні системи автоматичного управління 1.28 (2016): 3-9.
- 348. ДСТУ EN ISO 3381:2015 Залізничний транспорт. Акустика. Вимірювання шуму всередині.
- 349. Dirac Електроннийресурс. Режим доступу: https://www.dirac.com/ (дата звернення: 12.10.2021).
- 350. ДБН В.2.2-16-2019 "Культурно-видовищні та дозвіллєві заклади."

# ДОДАТОК А. ІНФОРМАЦІЯ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ

МІНІСТЕРСТВО КУЛЬТУРИ ТА СТРАТЕГІЧНИХ КОМУНІКАЦІЙ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «НАЦІОНАЛЬНИЙ АКАДЕМІЧНИЙ УКРАЇНСЬКИЙ ДРАМАТИЧНИЙ ТЕАТР ІМЕНІ МАРІЇ ЗАНЬКОВЕЦЬКОЇ»



20.11.2024 Nº 485

79008, м. Львів, вул. Лесі Українки, 1 тел./факс: (032) 235-47-51, zankovetska.com.ua e-mail: office@zankovetska.com.ua Код ЄДРПОУ 02224614

#### ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник генерального директорахудожнього керівника ДП «Національний академічний український драматичний театр ім. Марії Заньковецької» Роман ПОРАДА

#### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи на тему «Моделі, методи та засоби дослідження та покращення акустичних властивостей закритих приміщень» представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, доцента кафедри «Системи автоматизованого проектування» Національного університету «Львівська політехніка» Мельника Михайла Романовича

Цей акт підтверджує, що результати дисертаційної роботи Мельника Михайла Романовича за темою «Моделі, методи та засоби дослідження та покращення акустичних властивостей закритих приміщень» впроваджені під час аналізу акустичних характеристик театрального залу Національного академічного українського драматичного театру імені Марії Заньковецької.

Впровадження полягало в проведенні експериментальних досліджень для визначення впливу різних акустичних параметрів на якість звукового сприйняття. Зокрема, розроблені Мельником М.Р. методи використовувалися для оцінки ефекту зміни матеріалів та геометрії поверхонь приміщення. Це включало випробування трьох варіантів оббивки сидінь – легкої, середньої та товстої, для визначення їхньої здатності до звукопоглинання та впливу на акустичний комфорт глядачів.

Проведено обчислення і моделювання загального звукопоглинання для театрального залу з урахуванням особливостей приміщення та вибраних варіантів оббивки. Проведено вимірювався часу реверберації Т20 для визначення ефективності розроблених методів щодо досягнення оптимального часу реверберації, який необхідний для театральних просторів. Також визначено індекс чіткості C80 та індекс передачі мови STI, який визначає якість передачі мовлення на сцені та у залі, що є критичним для драматичних постановок.

Дослідження, виконані на основі дисертаційної роботи Мельника М.Р., забезпечили підвищення розуміння впливу матеріалів та геометричних параметрів на акустичну якість театральних просторів і сприяли оптимізації акустичних умов театру для покращення сприйняття звуку глядачами.

Начальник відділу капітального ремонту та реконструкції театру

Олександра ГЛУШКО



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki катерга месналікі і wibroakustyki

Kraków, 6 listopada 2024

#### Potwierdzenie wdrożenia wyników badań

Niniejszym potwierdza się, iż Mykhaylo MELNYK jest autorem ulepszonego systemu pomiarowego wdrożonego w Laboratorium Akustyki Technicznej, Katedry, Mechaniki i Wibroakustyki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. System został opracowany w ramach rozprawy doktorskiej pod tytułem "Modele, metody i narzędzia do badania i poprawy właściwości akustycznych pomieszczeń zamkniętych", przedstawionej w celu uzyskania stopnia doktora nauk technicznych, przez Mykhayla MELNYKA adiunkta Katedry Systemów Automatyzacji Projektowania w Narodowym Uniwersytecie "Politechnika Lwowska".

Wdrożenie wyników badań doktorskich Mykhayla MELNYKA obejmuje następujące elementy:

 Opracowanie inwersyjnej metody wyznaczania oporu przepływu powietrza w materiałach porowatych przy użyciu modelu Miki zastosowanej do porównania wartości współczynników pochłaniania dźwięku uzyskanych z rury impedancyjnej oraz wyznaczonych na stanowisku laboratoryjnym do pomiaru oporu przepływu powietrza dla materiałów porowatych.

2) Zmodernizowane stanowisko laboratoryjne do wyznaczenia oporu przepływu materiałów porowatych poprzez zastosowanie czujników MEMS, co pozwoliło na zwiększenie dokładności pomiarów poprzez możliwość zwiększenia liczby danych pomiarowych i ich uśrednieniu w krótszym czasie.

Opisany system pomiarowy jest wykorzystywany w Laboratorium Akustyki Technicznej do badań naukowych oraz służy do kształcenia studentów naszej Uczelni.

KIEROWNIK LABORATORIUM AKUSTYKI TECHNICZNEJ

dr hab. Inż. Todeusz Komisiński, posł. nadzw.

**XYTZUC** 



Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki KATEDRA MECHANIKI I WIBROAKUSTYKI al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. +48 12 617 30 64, fax +48 12 633 23 14 e-mail: kmlw@agh.edu.pl, http://kmiw.imir.agh.edu.pl/kmiw/

И"ЗАТВЕРДЖУЮ" роректор з наукової роботи аціонального університету ьвівська політехніка" прос Іван Демидов 2024 p H W \* AK

### про використання результатів дисертації "МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОКРАЩЕННЯ АКУСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАКРИТИХ ПРИМІЩЕНЬ" доцента кафедри систем автоматизованого проектування

МЕЛЬНИКА Михайла Романовича

представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук,

при виконанні науково-дослідних робіт Національного університету "Львівська політехніка". Ми, що нижче підписалися, начальник НДЧ д.т.н. Небесний Р.В. та члени комісії: завідувач відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень к.т.н. Лазько Г.В.; заступник завідувача планово-фінансового відділу Фаст І.І. та завідувач кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій Романишин Ю.М. цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи доцента кафедри систем автоматизованого проектування Мельника М.Р. використано під час виконання науково-дослідної роботи, яка виконувалась за кошти державного бюджету МОН України: "Високоточні функціонально-інтегровані сенсорні пристрої для магнітної діагностики плазми в термоядерних енергоустановках" (№ державної

Мельник М.Р. розробив математичні моделі і методи завадостійкого сигнального перетворення та спроектував аналоговий фронт-енд синхронного детектування для вбудованих систем на основі PSoC.

Голова комісії: Начальник НДЧ д.т.н., ст. дослідник

ресстрації 0121U109618).

Члени комісії: Зав. відділу НОСНД, К.Т.Н.

В.о. заст. нач. ПФВ

Керівник НДР д.т.н., професор

eter cleep Deey D

Роман НЕБЕСНИЙ

Галина ЛАЗЬКО

Ірина ФАСТ

Роман ГОЛЯКА

"Затверджую" Перший проректор Національного університету "Левіяська політехніка" проф. Олег МАТВІЙКІВ 2024 р.

AKT

про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи Мельника Михайла Романовича

Цей акт складено про те, що результати дисертаційної роботи Мельника Михайла Романовича впроваджено у навчальний процес кафедри "Систем автоматизованого проектування" Національного університету "Львівська політехніка".

Впровадження результатів дисертаційної роботи полягає в їхньому використанні при викладанні навчальних дисциплін як окремих розділів лекційних курсів, так і в циклах лабораторних робіт.

Зокрема для викладання дисципліни "Методи багатокритеріальної оптимізації" для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня "бакалавр", що навчаються за напрямом 122 "Комп'ютерні науки" використано такі результати:

 метод оптимізації процесу сигнального перетворення, який забезпечує оптимізацією ширини імпульсу активуючих звукових коливань за критеріями параметрів поширення сигналу в досліджуваному середовищі.

У лекційному курсі "Автоматизація проектування мікросистем" для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня "бакалавр", що навчаються за напрямом 122 "Комп'ютерні науки" використано такі результати:

 метод електро-теплової аналогії та синтезу електро-акустичних моделей вимірювальних перетворювачів акустометрії.

Завідувач кафедри САП, д.т.н., професор

Директор інституту IКНІ,

д.т.н., професор

Михайло ЛОБУР

Наталія ШАХОВСЬКА

ВАТВЕРДЖУЮ" Проректор знаукової роботи Національного університету вівська політехніка" Іван Демидов проф 2024 p. 3KTO 0207 IW AKT

## про використання результатів дисертації "МОДЕЛІ, МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПОКРАЩЕННЯ АКУСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАКРИТИХ ПРИМІЩЕНЬ" доцента кафедри систем автоматизованого проектування

МЕЛЬНИКА Михайла Романовича

представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, при виконанні науково-дослідних робіт Національного університету "Львівська політехніка".

Ми, що нижче підписалися, начальник НДЧ д.т.н. Небесний Р.В. та члени комісії: завідувач відділу науково-організаційного супроводу наукових досліджень к.т.н. Лазько Г.В.; заступник завідувача планово-фінансового відділу Фаст І.І. та завідувач кафедри систем автоматизованого проектування Лобур М.В. цим актом підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи доцента кафедри систем автоматизованого проектування Мельника М.Р. використано під час виконання науково-дослідної роботи, яка виконувалась за кошти державного бюджету МОН України: "Інноваційне використання твердотільних і нанокомпозитних матеріалів для керування субтерагерцовим випромінюванням" (№ державної реєстрації 0119U100609).

Мельник М.Р. розробив інформаційні моделі та модифікував програмну частину процесу автоматизованого керування експериментом при вимірюванні акустооптичної ефективності.

Голова комісії: Начальник НДЧ д.т.н., ст. дослідник

Члени комісії: Зав. відділу НОСНД, к.т.н.

В.о. заст. нач. ПФВ

Зав. каф. САП д.т.н., професор

And Coop Ques

Роман НЕБЕСНИЙ

Галина ЛАЗЬКО

Ірина ФАСТ

Михайло ЛОБУР