

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МЕЛЬНИК МИХАЙЛО РОМАНОВИЧ



УДК 004.94-534.84(043.5)

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

**05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт**

**РЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Львів – 2025

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор, **Лобур Михайло Васильович**, Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри систем автоматизованого проектування

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор, **Безкоровайний Володимир Валентинович**, Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України, професор кафедри системотехніки;  
доктор технічних наук, професор, **Шило Галина Миколаївна**, Запорізький національний університет Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри комп'ютерних наук;  
доктор технічних наук, професор, **Корнага Ярослав Ігорович**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України, декан факультету інформатики та обчислювальної техніки.

Захист відбудеться «16» квітня 2025 р. о 13:00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, аудиторія 226 головного корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Реферат розісланий «14» березня 2025 р.

*Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 35.052.05*



*Ростислав БУНЬ*

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дослідження акустичних властивостей приміщень та розроблення відповідних систем акустометрії є багатofакторними, 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, зокрема, амплітудно-частотних характеристик (АЧХ), фазо-частотних характеристик (ФЧХ) та низки інших частотних залежностей у вигляді спектрограм. Друга група базується на вимірюванні параметрів взаємодії компонентів середовища зі звуковою хвилею, зокрема, вимірюванні акустичного імпедансу з 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 звукових хвиль, часу реверберації, часу ранньої реверберації, розбірливості мовлення, індексу передачі мовлення, музичної розбірливості тощо.

Актуальність теми дослідження, присвяченого розробленню методів, моделей та засобів дослідження й поліпшення акустичних властивостей приміщень, зумовлена постійно зростаючими вимогами до якості акустичного середовища у закритих просторах – від концертних та театральних залів до офісів і житлових приміщень. Автоматизація проектування 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 проектування 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. Особливий внесок у розвиток методів і засобів автоматизації проектувальних робіт зробила професор Глоба Л. С., яка здійснила комплексні дослідження з моделювання інформаційних процесів у системах автоматизованого проектування. 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 змогу точно вимірювати й поліпшувати акустичні показники різних типів приміщень.

Під час аналізу тенденцій розвитку та наукової літератури за тематикою дисертаційної роботи показано роль основних чинників розвитку акустометрії з погляду домінуючого впливу сучасних інформаційних технологій, комп'ютерних наук та методів автоматизованого проектування засобів дослідження акустики приміщень. Першим чинником є спеціалізація 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 чинником є розвиток інформаційно-вимірювальних технологій в концепціях «розумної» техніки, зокрема - «розумного» будинку. В акустометрії цей чинник обумовив поняття адаптивної акустики. Третім чинником розвитку, що властиво враховує спеціальність цієї дисертаційної роботи, є подальший розвиток та спеціалізація систем автоматизованого проєктування (САПР) засобів акустометрії. Компонентами таких САПР є відповідні інформаційні та математичні моделі процесів, як проєктування та дослідження акустики приміщень, так і формування та перетворення інформативних сигналів в системах акустометрії.

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

Сукупність вищенаведених чинників розвитку та виявлене в цій дисертаційній роботі протиріччя можна узагальнити в цілісну **науково-прикладну проблему** розроблення методів, моделей та апаратно-програмних засобів акустометрії, що відповідають вище зазначеним вимогам концепцій UC та IIoT. Ця проблема вирішується з використанням концептуального та предметно-орієнтованого проєктування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження, проведені в межах цієї докторської дисертації, відповідають науковим напрямкам кафедри систем автоматизованого проєктування, пріоритетним напрямкам 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 нанокompозитних 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/АРМ/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.

TEMPUS-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:

1. Провести аналіз існуючих методів дослідження акустичних властивостей приміщень (акустометрії), їх компонентів та чинників впливу сучасних концепцій УС на подальший розвиток засобів та систем автоматизованого проєктування акустометрії.
2. 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.

7. Розробити метод комплексної верифікації апаратно-програмних засобів дослідження акустики відповідно до вимог пристроїв в концепції повсюдного комп'ютингу.
8. 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 проектування систем дослідження акустичних властивостей приміщень.

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

**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 коефіцієнтів 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 імпедансної труби за рахунок порівняння тільки одного числа опору потоку 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 проектування 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 проектування 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 апаратно-програмних 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 проектування.

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 (P-зонд) та швидкості потоку (U-зонд) повітря, що дає змогу реалізувати системи автоматизованого проектування 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 проектування комп'ютерних систем акустометрії відповідно до концепцій УС, Індустрії 4.0 та ІоТ, 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:

1. Розроблено алгоритм дослідження акустичних властивостей закритих приміщень, який відповідає критеріям предметно-орієнтованого проектування комп'ютерних систем акустометрії відповідно до концепції УС 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.
2. 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.
4. 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 експериментальних даних із лабораторної установки вимірювання опору повітряному потоку пористих матеріалів та імпедансної труби автоматизує визначення, порівняння та добір коефіцієнтів звукопоглинання.
7. Розроблене інформаційне, програмне та методичне забезпечення підсистеми автоматизованого добору звукоізоляційних матеріалів підвищило ефективність проектування звукоізоляції будівель і акустичних приміщень завдяки автоматизації формування звітів і документації, що скорочує час виконання проектних 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.
8. Розроблена підсистема оцінки акустичної якості приміщень методом Беранека автоматизує процес аналізу акустичних параметрів оперних і концертних залів, підвищує ефективність їх проектування 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 Гірничо-металургійної академії ім. С. Сташиця (Польща), Акт про впровадження від 06.11.2024 р.; у навчальному процесі на кафедрі систем автоматизованого проектування 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 коефіцієнтів 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 еквівалентного рівня звуку; [23, 58] – дослідження точності методів визначення часу реверберації та підсистема пакетного аналізу зареєстрованих аудіофайлів результатів експериментів; [8; 9; 52] – інформаційні моделі підсистем; [4] – проведено аналіз впливу забруднення 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 (IoT); [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] – експериментальне дослідження, калібрування моделі; [32] – структурну модель інтегрованої системи проектування; [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] – експериментальне дослідження 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 MATLAB 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] – експериментальне 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 об'єктів; [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.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання досліджень. Визначено наукову новизну отриманих результатів та їх практичну цінність. Наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів дисертаційних досліджень та публікації.

У **першому розділі** проведено аналіз проблематики дисертаційної роботи. Показано, що 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).

Перша група охоплює частотні властивості, зокрема АЧХ, ФЧХ та низку інших частотних залежностей у вигляді спектрограм. Друга група властивостей, будучи похідною від першої, базується на частотних характеристиках, однак за основу аналізу тут беруть властивості комплексної взаємодії компонентів середовища зі звуковою хвилею. Таку комплексну взаємодію характеризують акустичним імпедансом із представленням у вигляді комплексних чисел – дійсної та уявної чи реактивної складових. Дослідження характеристик цієї групи проводять у спеціалізованих акустичних інструментах, зокрема – імпедансних трубах. В останній період розвитку акустометрії сформувався напрям і 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, що є основою мікрофонних вимірювань, та швидкості мікропотоків газу під час поширення звукової хвилі. Вимірювання цих мікропотоків здійснюють MEMS термоанемометрами. Здебільшого In-situ імпедансометрію проводять за допомогою спеціалізованих P-U зондів звукової інтенсивності.



Рис. 1. Основні групи досліджень акустики приміщень

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, T30, T20), час ранньої реверберації (Early Decay Time, EDT) тощо.

Під час аналізу тенденцій розвитку та наукової літератури за тематикою дисертаційної роботи показано роль трьох основних чинників розвитку акустометрії з погляду домінуючого впливу сучасних інформаційних технологій, комп'ютерних наук та методів автоматизованого проектування засобів дослідження акустики приміщень (рис. 2).

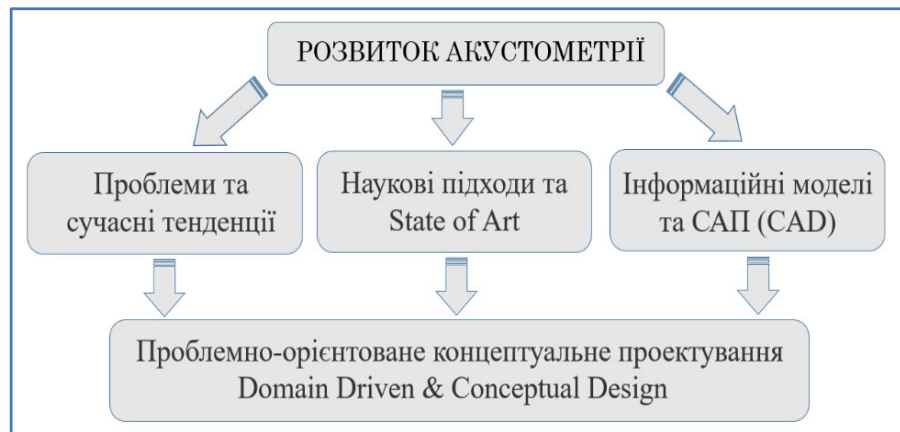


Рис. 2. Фактори розвитку акустометрії

Першим чинником, який 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 у відповідності до

концепції повсюдного комп'ютингу UC, Індустрії 4.0 та ІоТ.

Другий чинник враховує подальший розвиток наукових підходів інформаційно-вимірювальних технологій, зокрема технології SMART (Self-Monitoring Analysis and Reporting Technology) та концепції «розумної» техніки (Smart Tech), «розумного» будинку (Smart Home) тощо. В акустометрії цей чинник враховує розвиток напрямку ексклюзивної (State of Art acoustics) та адаптивної (Adaptive acoustics) акустики. 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. Третій чинник обумовлений подальшим розвитком інформаційних моделей, САПР, 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 чинники розвитку обумовили ефективність використання в цій дисертаційній роботі, як з погляду вирішуваної проблеми, так і формулювання конкретних задач наукових досліджень, методу проблемно-орієнтованого проектування, який споріднений з предметно-орієнтованим та концептуальним проектуванням. Метод орієнтований на комплексне вирішення задач проектування складних об'єктів з концентрацією основної уваги на предметній області та створенням програмних моделей, які відображують глибоке розуміння предметної області.

Результати проведеного аналізу стали основою формування розширеного представлення проблематики акустометрії, основні аспекти якої, зокрема з погляду на САПР та їх комплексні моделі, показано на рис. 3.

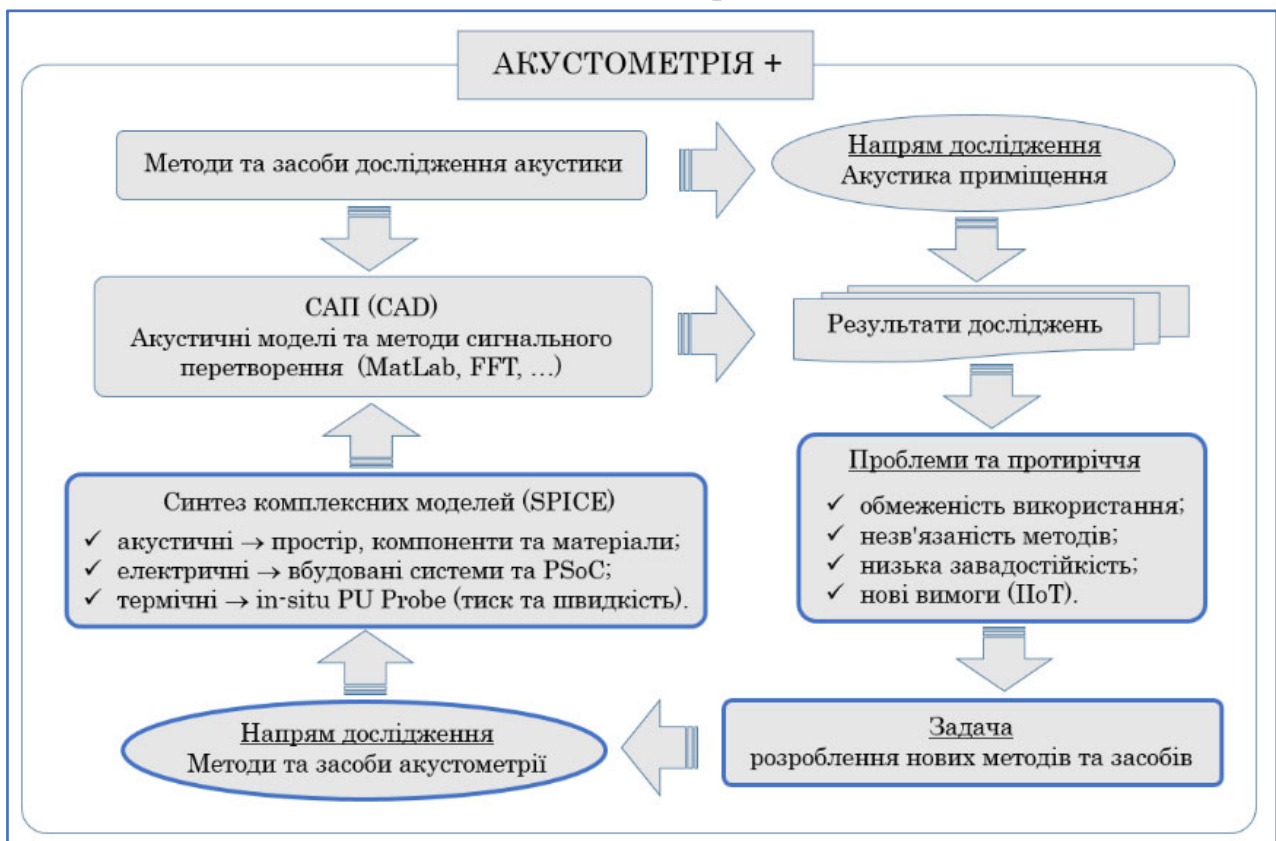


Рис. 3. Діаграма компонентів акустометрії

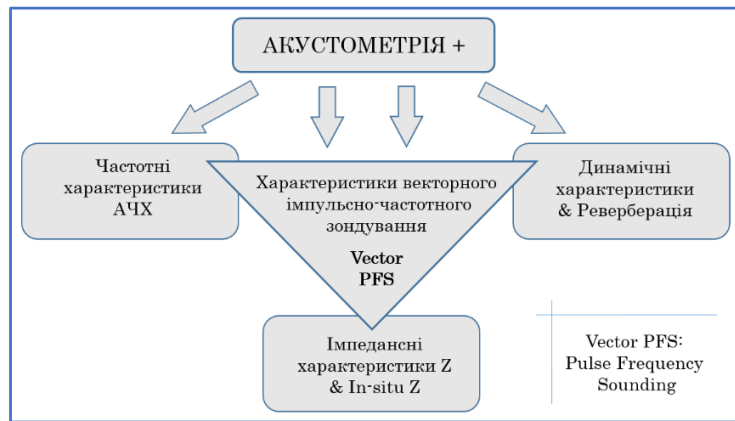


Рис. 4. Взаємодія напрямів дослідження у концепції дисертаційної роботи

У другому розділі наведено основні підходи, методи та рішення. Взаємодію напрямів дослідження відповідно до основної концепції дисертаційної роботи подано на діаграмі рис. 4. У дисертаційній роботі розроблено новий метод акустометрії з формулюванням оригінального терміну – **векторне імпульсно-частотне зондування (ІЧЗ)**.

Метод векторного ІЧЗ визначається комбінацією та синергією трьох взаємодоповнюваних науково значимих рішень:

- *по-перше*, дослідження проводять шляхом збурень зондуючих імпульсів звукових коливань, тривалість та спектр яких оптимізується у відповідності 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 набором одночастотних коливань, детектування яких здійснюється на основі кореляційних та автокореляційних методів частотної селекції.

У рамках запропонованого методу акустометрії 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 ІЧЗ, 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 – ехо-сигнал 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 за 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.

Часові епюри, які відображають процес формування та накладання імпульсів під час їх реверберації в приміщенні подано на рис. 5. Показано, що крім вищезгаданого протиріччя щодо тривалості імпульсів  $W_p$ , їх формування визначається також сталою часу  $\tau$  встановлення рівноважного стану коливального процесу, зокрема інерційністю джерел активації звукових коливань. Вихідний сигнал  $S$  представлений напругою інтегратора, а стохастичний процес – шумовою складовою  $N$ .

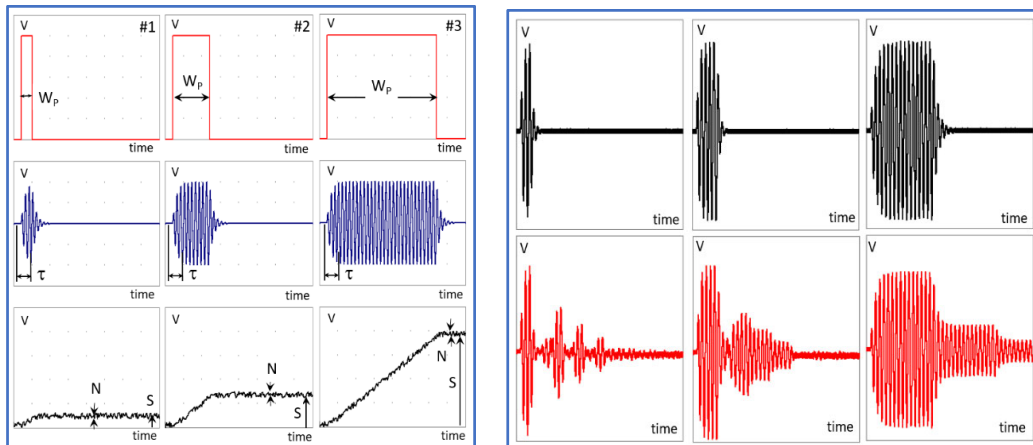


Рис. 5. Епюри формування сигналів за різної тривалості  $W_p$

У дисертаційній роботі дослідження проводили, використовуючи програмний комплекс REW (Room EQ Wizard Room Acoustics Software). 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 подано на рис. 6, а приклад осцилограми ІЧЗ, отриманої експериментальними дослідженням з адаптованими параметрами та компенсацією вищезгаданих артефактів – на рис. 7. Виявили високу роздільну здатність методу вимірювання ( $dT = 10$  мс) та його інформативність щодо аналізу параметрів ехо-сигналів.

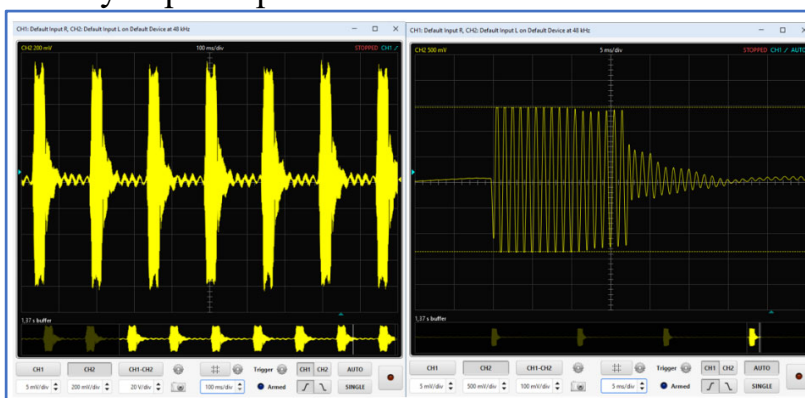


Рис. 6. Приклади осцилограм ІЧЗ з наявністю артефактів

Розроблення систем акустометрії та їх САПР є комплексним процесом, що включає в себе певну послідовність взаємозв'язаних етапів. Спочатку визначають методи та засоби модельного дослідження сигнальних трактів. Важливо зазначити, що предметами модельних досліджень цих трактах є електричні та акустичні сигнали.

Відтак, формулюється проблема уніфікації методів їх досліджень із синтезом єдиної електро-акустичної моделі.

Показано, що з метою розроблення 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). У дисертаційній роботі цю 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. Виконано аналіз можливості використання методу аналогій для побудови уніфікованих макромоделей та запропоновано новий метод їх синтезу.

Далі проведено комплекс досліджень сигнальних трактів акустометрії. 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 електричних кіл – підсилювачів, фільтрів, аналого-цифрових перетворювачів тощо. Апробацію запропонованих рішень здійснено в концепції програмованих систем на кристалі PSoC.

Призначенням модельного імітатора сигналів є формування масивів даних, на основі яких перевіряються та оптимізуються методи подальшого перетворення сигналів, зокрема, швидкого перетворення Фур'є (FFT) та частотної селекції з використанням бібліотек математичних перетворень в середовищі MatLab. Діаграму взаємозв'язків етапів досліджень та розроблення систем акустометрії з використанням розробленого в рамках дисертаційної роботи модельного імітатора сигналів Data@Sim представлено на рис. 8.

В основі експериментів, результатами яких є дані фізичних досліджень, лежать методи та засоби вимірювальної техніки. Ці дані використовуються, як для безпосереднього їх аналізу методами числового перетворення сигналів, зокрема з використанням відповідних функцій системи MatLab, так і для верифікації та корекції математичних моделей імітатора віртуальних даних.

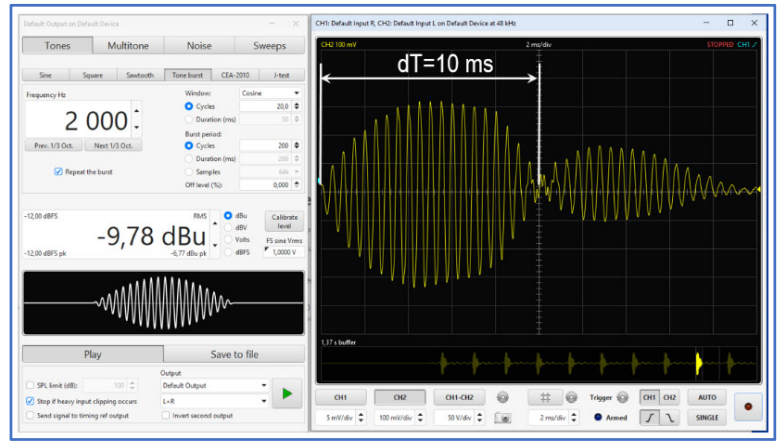


Рис. 7. Приклад осцилограми ІЧЗ з адаптованими параметрами



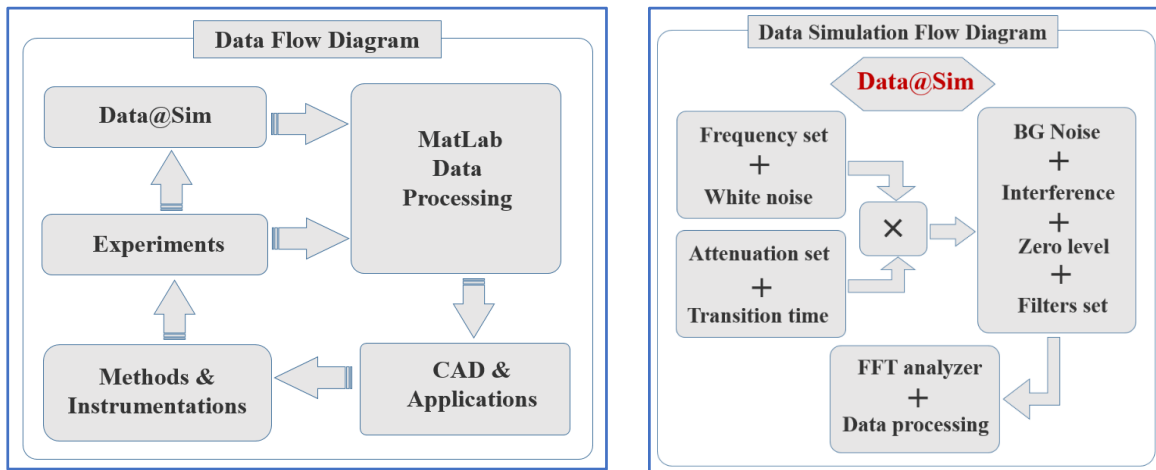


Рис. 8. Структура етапів дослідження з використанням Data@Sim

Приймаючи до уваги сформульовані вище положення, у дисертаційній роботі вирішено задачі, як подальшого удосконалення САПР акустометрії (CAD & Applications), так і симулятора віртуальних сигналів (Data@Sim). 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 (рис. 9).

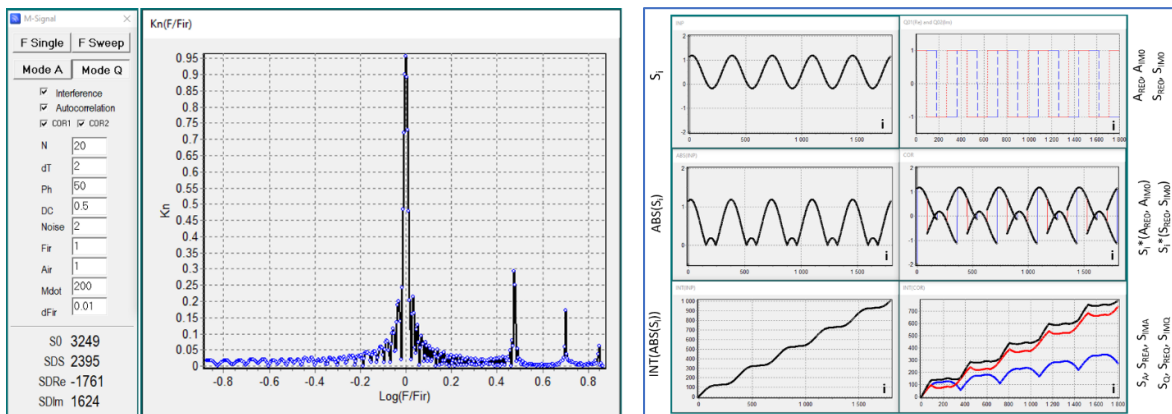


Рис. 9. Основні вікна програмного забезпечення M-Signal

У третьому розділі дисертаційної роботи представлено результати розроблення SPICE макромделей систем автоматизованого проектування засобів акустики. Об'єктами та процесами досліджень є (рис. 10):

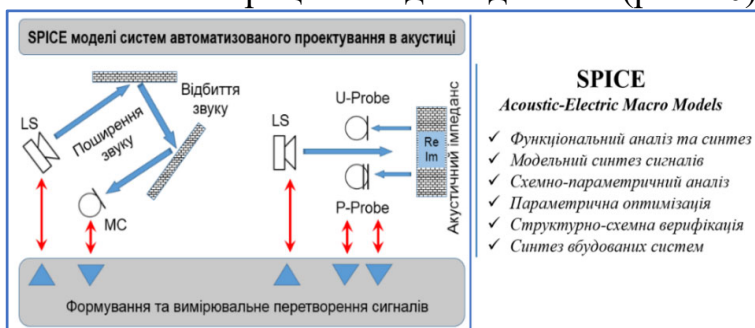


Рис. 10. Ілюстрація задач розроблення SPICE макромделей САПР акустики

- випромінювачі акустичних хвиль, зокрема, електроакустичний перетворювач - гучномовець;
- вимірювачі акустичних хвиль, зокрема, мікрофон;
- комплексні вимірювачі акустичного імпедансу, основою яких є вимірювальні перетворювачі тиску (P-зонд) та швидкості потоку (U-зонд) повітря;
- поширення та відбиття звукових коливань у просторі, зокрема, з урахуванням дійсної (Re) та уявної (Im) складових акустичного імпедансу;

- формування та вимірювальне перетворення сигналів, зокрема, схем їх генерування, підсилення, аналогового та цифрового перетворення тощо.

Основними компонентами схем заміщення таких SPICE макромоделей (рис. 11) є лінії затримки  $\Delta T$  DELAY MACRO, підсилювачі  $K$  сигналів та RLC реактивні кола, що специфікують імпеданс поверхонь відбивання. Ілюстрацію синтезу SPICE моделі електричного та акустичного перетворення подано на рис. 12.

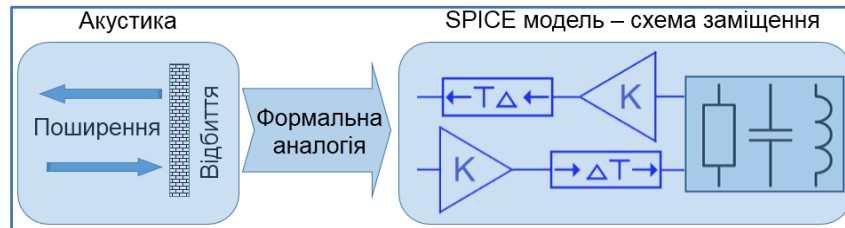


Рис. 11. Формальна аналогія в SPICE моделях акустометрії

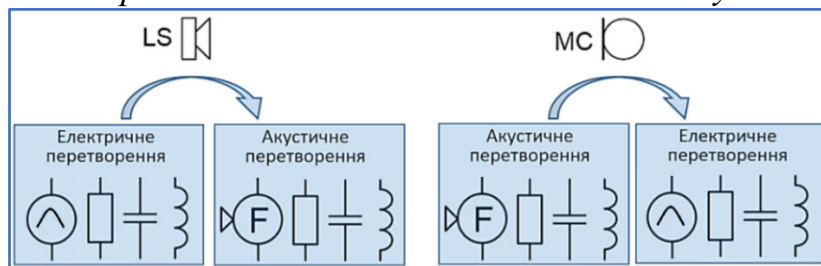


Рис. 12. Ілюстрація синтезу SPICE моделі комплексного електричного та акустичного перетворення

Використано метод електротеплової аналогії, який 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 до них електричним опором  $R_T$  та ємністю  $C_T$  конденсатора. Відтак, теплові перехідні процеси описуються еквівалентними схемами у вигляді декількох  $R_i C_i$  ланок.

Розроблено алгоритм синтезу SPICE моделей термічних сенсорів потоку для пристроїв акустичної імпедансометрії. Послідовність реалізації цього алгоритму представлено п'ятьма етапами:

- переходу від конструктивних та електрофізичних параметрів MEMS структур до параметрів SPICE моделі;
- синтезу схеми заміщення узагальненої моделі калориметричного сенсора потоку;
- специфікації динамічних характеристик, які визначаються часовими параметрами теплової релаксації компонентів MEMS структури;
- синтезу схеми заміщення вихідного кола різницевого сенсора температури;
- синтезу схеми заміщення теплового сенсора потоку в цілому.

Часова залежність температури  $T(t)$  в імпульсному режимі нагріву потужністю  $P$  та подальшого охолодження можна записати у вигляді

$$T(t) = T_A + P Z_Q(t), \text{ де } Z_Q(t) \text{ – тепловий опір;}$$

$$Z_Q(t) = \sum_{i=1}^N Z_{Qi} \left( 1 - \exp\left(-t/\tau_i\right) \right) \text{ – під час нагріву; } Z_Q(t) = \sum_{i=1}^N Z_{Qi} \exp\left(-t/\tau_i\right) \text{ – під час}$$

охолодження;  $Z_{Qi}$  – теплові опори ділянок структури в постійному режимі нагріву;

$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N$  – теплові постійні цих ділянок структури  $\tau_i = Z_{Qi} \cdot C_{Ti}$ ;  $C_{Ti}$  – теплоємність  $i$ -ї ділянки структури. Для теплового аналізу MEMS структури інтегральної схеми теплового сенсора потоку виділяють параметричні ділянки, кожен з яких описують характерними для них величинами  $Z_{Ti}$ ,  $C_{Qi}$ . Зокрема, перша ділянка відповідає мембрані, тепловий опір якої найвищий, а тепла стала – найменша. Друга ділянка відповідає кристалу MEMS структури. Для дослідження динаміки зміни сигналу за швидкої зміни параметрів потоку чи оточуючого середовища загалом, їх також представляють відповідними тепловими опорами та теплоємностями. Схему заміщення SPICE моделі та приклад результату дослідження наведено на рис. 13.

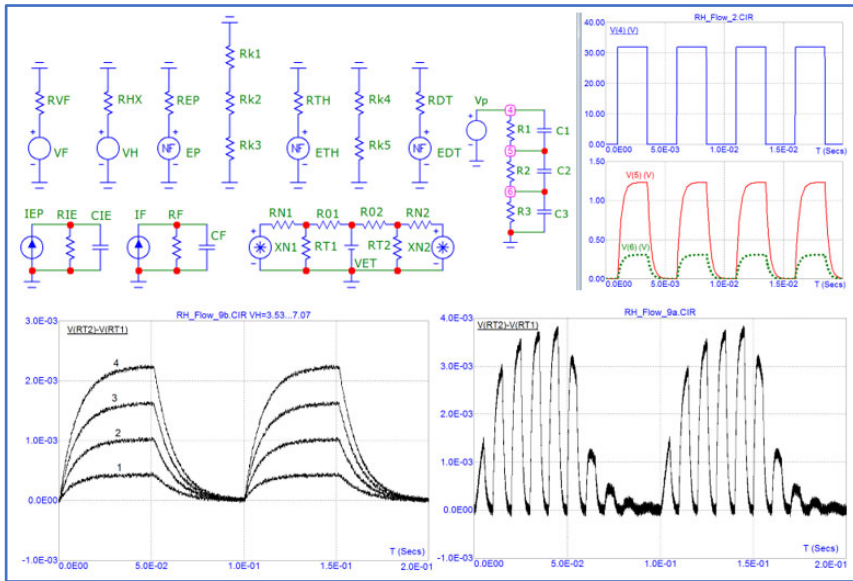


Рис. 13. Схема заміщення SPICE моделі та приклад результату дослідження

- розроблення моделі симулятора віртуальних сигналів Data@Sim;
- розроблення методу оптимізації перетворення сигналів.

Приклад моделі та результату дослідження сигнального тракту акустометрії з формуванням колірному шуму та домінуючої гармоніки показано на рис. 14.

Метою розроблення моделі симулятора віртуальних сигналів Data@Sim є синтез віртуальних даних, на основі яких проводять удосконалення та верифікацію методів перетворення сигналів САПР акустометрії. Синтез та використання таких віртуальних даних є критично важливим процесом. Пояснити це можна низкою чинників.

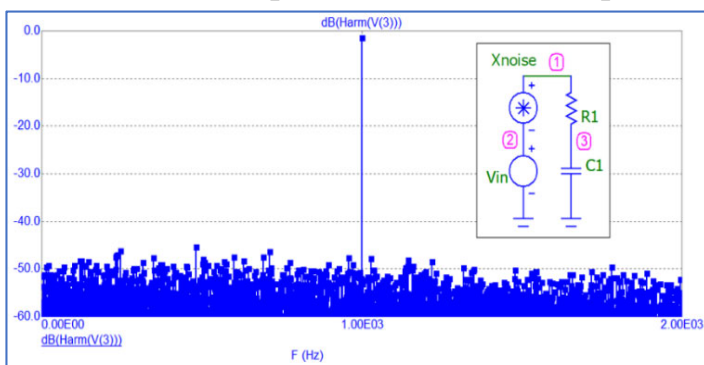


Рис. 14. FFT перетворення колірному шуму з домінуючої гармонікою

У четвертому розділі представлено результати розроблення SPICE макромодель сигналних трактів систем акустометрії.

Показано, що процес розроблення систем акустометрії поєднує певну послідовність взаємозв'язаних етапів. Відповідно до поставлених задач подано основні результати науковоприкладних робіт, що охоплюють:

- вибір методів та моделей функціонального аналізу сигналних трактів;

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 насамперед значний об'єм цих даних, а також неможливість у низці задач провести необхідну кількість експериментальних досліджень.

По-друге, під час експериментальних досліджень, особливо в приміщеннях з значним фоновим шумом, приступає значна кількість артефактів. Їх ідентифікація та компенсація є складним завданням, що потребує удосконалених методів перетворення сигналів. Своєю чергою удосконалення цих методів потребує значної кількості даних – як опорних, за допомогою яких встановлюють початкові умови експерименту, так і даних із різноманітними паразитними інтерференціями та завадами.

По-третє, синтез значного об'єму віртуальних даних є необхідний для використання методів нейронних мереж та штучного інтелекту. На цьому етапі розвитку комп'ютерних наук використання цих методик надзвичайно актуальне. Це передбачає проведення відповідних досліджень у напрямку машинного навчання та відлагодження відповідних нейронних мереж, а відтак, вимагає генерування значної кількості даних. Приклади макромоделей встановлення, відбиття та затухання звукових коливань подано на рис. 15, а форми сигналів під час їх формування – на рис. 16.

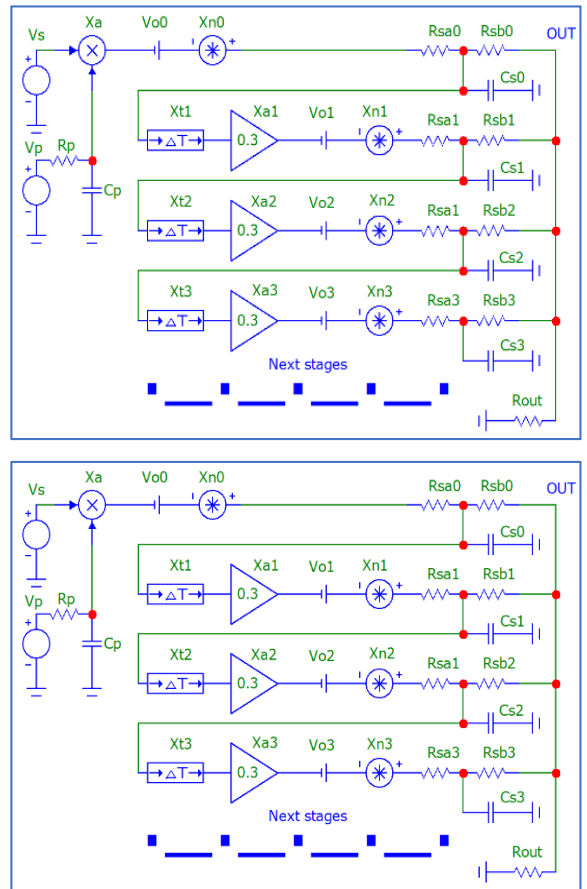


Рис. 15. Макромоделі встановлення, відбиття та затухання звукових коливань

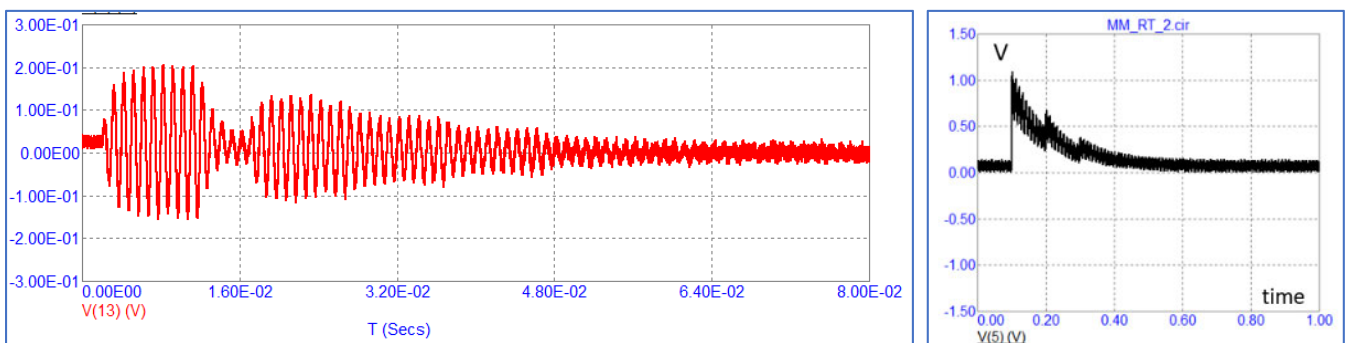


Рис. 16. Сигнали під час їх формування

Розроблено метод оптимізації перетворення сигналів за критерієм просторової та частотної селективності. Просторова роздільна здатність формується методами та засобами вимірювання параметрів ехо-сигналів. Високі значення цього параметра 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 використанні кореляційних чи автокореляційних функціональних перетворень, що передбачає збільшення часу інтегрування результатів цих перетворень, а отже, 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  $W_P$  звукових коливань від параметрів процесу формування сигналу:

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

де  $F_0$  – частота звукового коливання;  $F_{IF}$  – частота паразитної складової інтерференції (завади);  $\tau$  – характеристичний час встановлення (спаду) звукових коливань;  $S$  – потужність сигналу;  $S/N$  – співвідношення сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio);  $t_{MINR}$  – мінімальний час першого інформативного відлуння;  $[E]$  – матриця параметрів сигнального тракту.

Приклади результатів досліджень сигналів у методі оптимізації їх перетворення за критерієм просторової та частотної селективності показано на рис. 17.

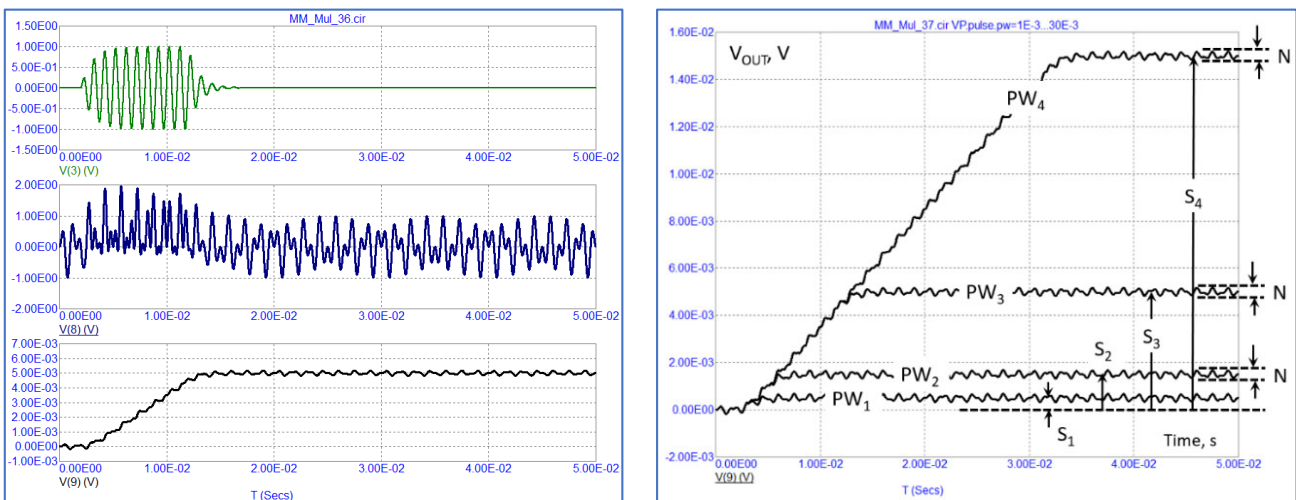


Рис. 17. Приклади результатів досліджень під час оптимізації перетворення сигналів

У п'ятому розділі розглянуто спеціалізовані методи та засоби експериментальних досліджень акустики приміщень. Сформульовано та вирішено задачу розроблення вбудованої системи дослідження акустичних параметрів з умовною назвою AMES (Acoustic Measurement Embedded System) (рис. 18). 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.

Частотну селекцію реалізовано режимами Mode #N, які охоплюють методи кореляційного перетворення Mode A та квадратурного детектування Mode Q. Перевагою вбудованої системи AMES є реалізація вхідного тракту змішаного сигнального перетворення на основі методу селективного підсилення заряду. Основні вікна програмного забезпечення вбудованої системи AMES представлено на рис. 19.

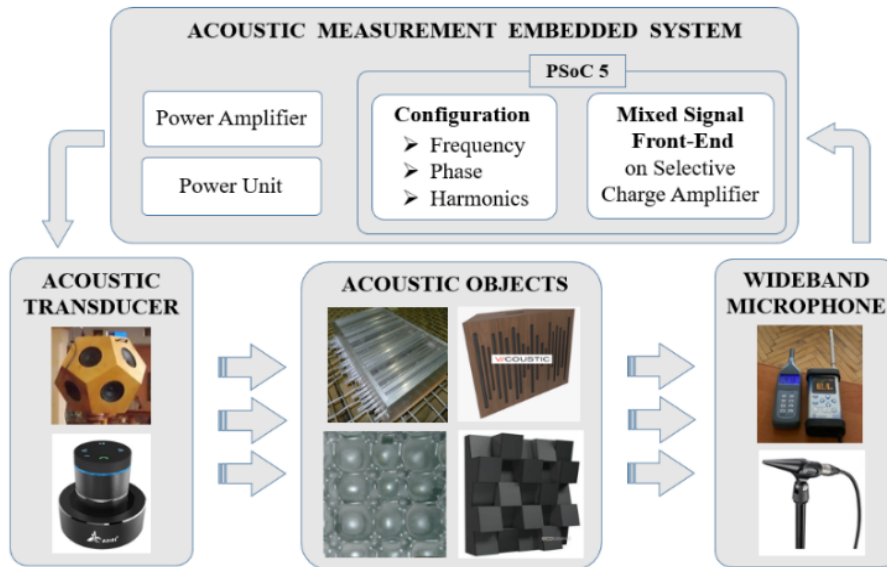


Рис. 18. Вбудована система дослідження акустичних параметрів AMES

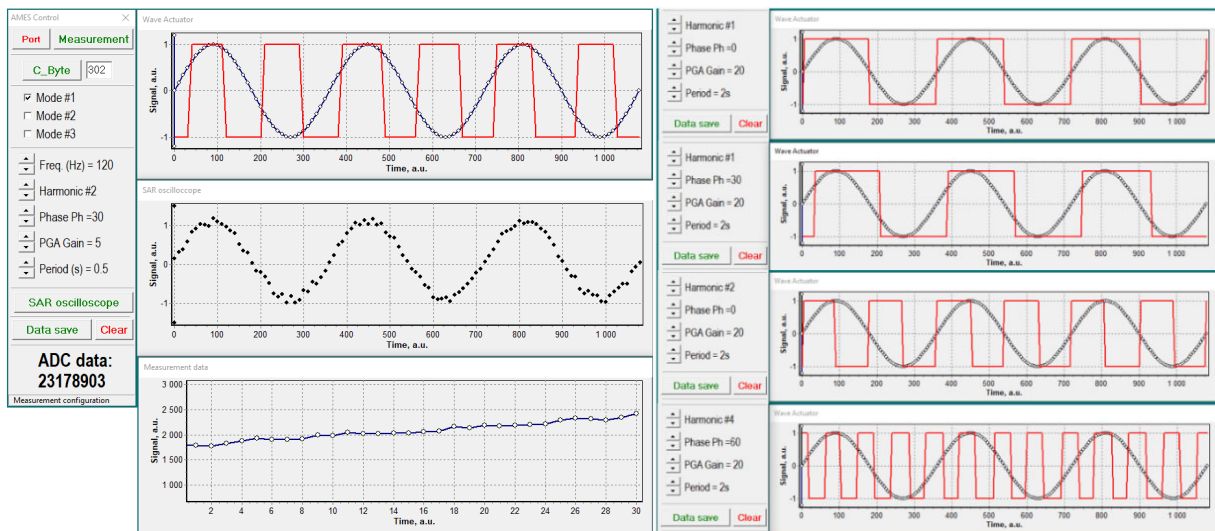


Рис. 19. Основні вікна та приклади режимів вимірювання AMES

Розглянуто типові методи досліджень на прикладі інтегрованого середовища вимірювання акустики приміщення та аудіопристроїв REW. 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, затримки та спектрального розкладу, спектрограм і кривих енергія/час; генерування графіків аналізатора реального часу; розрахунок часу реверберації; визначення частот і часів загасання модальних резонансів; відображення відгуків еквайзера та автоматичне налаштування параметричних еквайзерів для протидії паразитним ефектам; моделювання адаптивної акустики відповідно до цільової задачі.

Проведено аналіз проблем, які виникають, як під час дослідження акустичних характеристик приміщень з урахуванням вимог розвитку інформаційних технологій, так і комп'ютерної техніки в галузі акустометрії. Показано, що основним протиріччям у цьому процесі 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, які використовуються.

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; дослідження ефективності методу розпізнавання акустичних шумів та електромагнітних завад; дослідження ефективності методики гармонічного аналізу та типових для акустометрії RTA фільтрів з кратними до октави смугами частот та їх співставлення з результатами FFT; аналіз коректності ходу вимірювання та калібрування пристроїв дослідження акустичних характеристик.

Верифікацію та калібрування здійснюють, використовуючи еталонні засоби акустометрії відповідно до стандартів PN-EN ISO / IEC 17025 International Standard for Testing and Calibration Laboratories, зокрема чотириканального аналізатора звуку та вібрації класу 1 SVAN 958A. Для прикладу на рис. 20 представлено засоби та хід верифікації коректності функціонування мобільного вимірювача шуму масового використання SL5868. Як еталонний пристрій використано аналізатор звуку класу 1 SVAN 958A та спеціалізоване джерело акустичних хвиль власної розробки відповідно до запропонованого у дисертаційній роботі методу векторного імпульсно-частотного зондування. Для підвищення достовірності, калібрування здійснювали, використовуючи сигнали різного частотного діапазону, зокрема гармонічних коливань, білого та рожевого шумів тощо. Під час верифікації проводили 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 та часів реверберації RT60, T30, T20. На основі цих параметрів визначали розбірливість мовлення та індекси музичної розбірливості – C50 та C80.

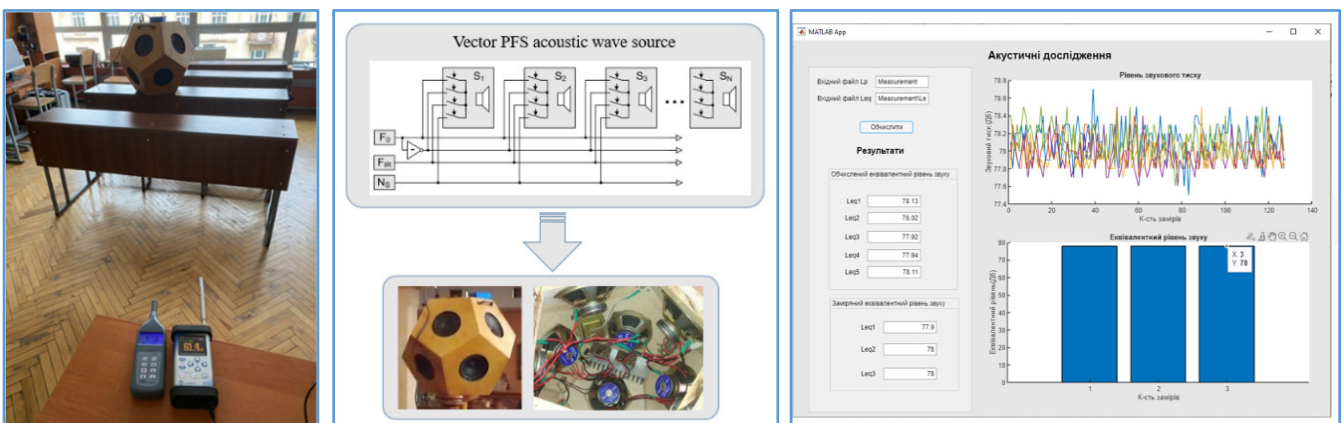


Рис. 20. Засоби та процес верифікації засобів дослідження акустики

Основним критерієм коректності результатів таких досліджень є взаємне співпадіння частотних характеристик значень часу реверберації RT60, T30 та T20. Тестові дослідження проводять у приміщеннях чи спеціалізованих боксах із мінімальним часом реверберації відповідно до ДСТУ EN ISO 3382-2:2022. Наведено



типові результати вимірювань в різних умовах проведення експериментів, зокрема, за значних рівнів шуму та нелінійних спотворень (рис. 21).



Рис. 21. Результат дослідження відповідно до ДСТУ EN ISO 3382-2:2022 (case #1)

**Шостий розділ** присвячено подальшому розвитку методів акустометрії, спрямованих на визначення 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 під час визначенні їх звукопоглинальних властивостей. Зокрема, акцент зроблено на розробленні нових методів, модифікації лабораторного обладнання, удосконаленні алгоритмів аналізу даних та підборі акустичних матеріалів для досягнення заданих характеристик.

Представлено розроблені методи та програмні комплекси, призначені для автоматизації процесу вимірювання та аналізу результатів звукопоглинальних властивостей. Запропоновані рішення встановлюють залежність між питомим опором повітряного потоку та частотно-залежним коефіцієнтом звукопоглинання, отриманим із експериментальних вимірювань в імпедансній трубі. Цей підхід забезпечує ефективне порівняння двох методів шляхом оцінки одного параметра – питомого опору повітряному потоку – замість порівняння графіків коефіцієнта звукопоглинання від частоти. Ця оптимізована методологія полегшує швидке та ефективне порівняння властивостей звукопоглинання. Потім результати співставили з результатами, отриманими за допомогою нового методу, заснованого на узгодженні коефіцієнта звукопоглинання. Аналіз показує, що обидва методи визначення опору повітряному потоку можна широко використовувати, як у випадку оздоблювальних матеріалів, так і типових акустичних матеріалів, які вживають для наповнення акустичних панелей. Результати представлено дослідження є актуальними з точки зору полегшення проектування та оптимізації акустичних шаруватих матеріалів і акустичних матеріалів з текстильними покриттями.

Удосконалено лабораторну установку вимірювання опору потоку повітря, використавши давач тиску Sontay PA-60-2-NA, який має точність  $\pm 1\%$  усієї шкали, а для реєстрації потоку повітря 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. 22, а його фото відповідно на рис. 23. Модернізація стенду дала змогу досягти більшої точності за допомогою використання точніших давачів.



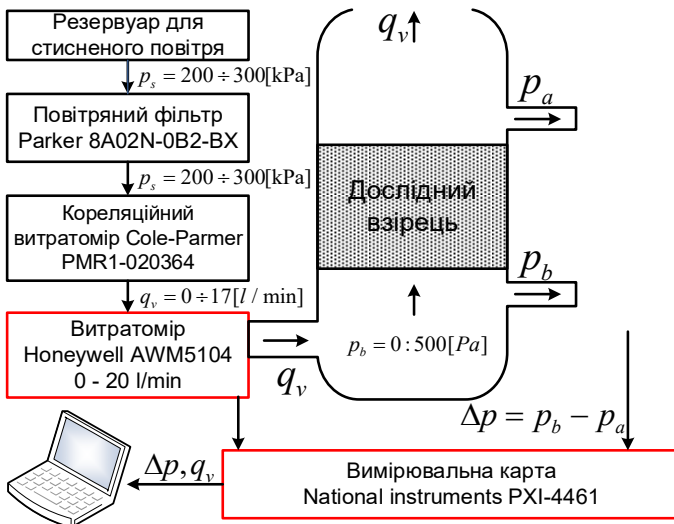


Рис. 22. Схема вимірювального стенду



Рис. 23. Фото лабораторного стенду вимірювання опору потоку повітря

Розроблено метод попередньої лінійної апроксимації (PLA), який включає такі кроки:

1. На наборі даних залежності питомого опору потоку повітря від швидкості потоку повітря  $R_S(u)$  знайти мінімальне значення швидкості потоку повітря  $u_{\min}$ , за якого розкид результатів не перевищуватиме заданого порогового значення  $\varepsilon$ :

$$u_{\min} = \min\{u : R_S(u) \leq \varepsilon\},$$

2. Визначити, якій швидкості потоку повітря  $q_v$  і різниці тиску  $\Delta p$  відповідає мінімальне значення швидкості потоку повітря  $u_{\min}$ .
3. Знайти апроксимуючу функцію методом лінійної апроксимації залежності швидкості потоку повітря  $q_v$  від різниці тиску  $\Delta p$  для діапазону, що відповідає значенням швидкості потоку повітря від максимального до  $u_{\min}$ .
4. Використовуючи знайдену апроксимуючу функцію та застосувавши екстраполяцію, визначити значення опору потоку повітря для швидкості потоку 0,5 мм/с.

Для забезпечення більшої точності формули обчислення лінійного потоку та опору потоку перераховані з урахуванням одиниць вимірювання датчиків тиску та потоку. Також введено діаметр вимірювальної установки, який дорівнює 100 мм, і дорівнює діаметру великої імпедансної труби. Це дає можливість порівняти результати, отримані для тих самих зразків двома методами. Виведені формули представлено нижче.

Для визначення лінійного повітряного потоку:

$$u \left[ \frac{m}{c} \right] = \frac{q_v \left[ \frac{m^3}{c} \right]}{A [m^2]} = \frac{q_v \left[ \frac{m^3}{c} \right]}{\frac{\pi}{4} (d_{уст.} [m])^2} = \frac{6 \cdot 10^4 q_v \left[ \frac{l}{хв.} \right]}{\frac{\pi}{4} (0,01 [m])^2} = \frac{q_v \left[ \frac{l}{хв.} \right]}{150 \cdot \pi}$$

де  $d_{уст.}$  – діаметр отвору для розміщення пористого матеріалу, що досліджується.

Для визначення питомого опору повітряному потоку:

$$R_s \left[ \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}} \right] = \frac{R \left[ \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}^3} \right]}{u \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right]} = \frac{\Delta p}{qv \cdot u} = \frac{150\pi \cdot \Delta p [\text{Па}]}{qv \left[ \frac{\text{л}}{\text{хв}} \right]}$$

Опір повітряному потоку визначаємо з виразу:

$$r_s \left[ \frac{\text{Па} \cdot \text{хв} \cdot \text{м}}{\text{л}} \right] = \frac{R_s \left[ \frac{\text{Па} \cdot \text{хв}}{\text{л}} \right]}{D [\text{м}]} = \frac{150\pi \cdot \Delta p [\text{Па}]}{qv \left[ \frac{\text{л}}{\text{хв}} \right]} \cdot D [\text{м}]$$

де  $D$  – товщина дослідного зразка.

Розроблено інверсний метод визначення питомого опору повітряного потоку пористих матеріалів, 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 можна записати у вигляді:

$$U(\sigma) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_{t,i} - \alpha_{m,i})^2}{N}}$$

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 визначаємо характеристичний опір  $z_c$  і хвильове число  $k_c$  для заданого матеріалу:

$$z_c = \rho_0 c_0 \left[ 1 + 0,07(f / r_s)^{-0,632} - j \cdot 0,107 f / r_s)^{-0,632} \right],$$

$$k_c = \frac{\omega_0}{c_0} \left[ 1 + 1,109(f / r_s)^{-0,618} - j \cdot 0,16(10^3 \cdot f / r_s)^{-0,618} \right]$$

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 залежності:

$$z_w = -i \cdot z_c \cdot \cot(k_c \cdot D)$$

де  $D$  – товщина матеріалу.

Коефіцієнт відбиття звуку  $R$  розраховується за формулою:

$$R = \frac{\frac{z_w}{\rho_0 c_0} \cos(\theta) - 1}{\frac{z_w}{\rho_0 c_0} \cos(\theta) + 1}$$

де  $\theta = 0$  – кут падіння звуку. Для розрахунку коефіцієнта звукопоглинання слугує формула:

$$\alpha_{i,i} = 1 - |R^2|.$$

Запропонований інверсний метод визначення опору потоку повітря за коефіцієнтами звукопоглинання включає такі кроки:

1. Ділимо діапазон пошуку опору потоку повітря щонайменше 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  $R^2$  (дослідження показали, що два параметри дають однаковий 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  $R^2$  найбільше.

Для спрощення порівняння результатів, отриманих з імпедансної труби Bruel & Kjaer (рис. 24) і установки для продування повітрям пористих матеріалів розроблено програмне забезпечення, у якому реалізовано запропонований метод.



Рис. 24. Імпедансна труба (тип 4206, Brüel & Kjaer)

Алгоритм розробленого математичного забезпечення підсистеми подано на рис. 25, а головне вікно розробленої підсистеми – на рис. 26.

Проведені дослідження розробленого інверсного методу визначення коефіцієнтів опору потоку повітря на основі коефіцієнтів звукопоглинання показали, що він метод відкрив нові можливості для синтезу акустичних матеріалів та добору їх товщини з метою отримання оптимальних характеристик.

Розроблений метод підбору матеріалів включає такі кроки:

1. Вибір необхідного коефіцієнта звукопоглинання для конкретного акустичного застосування;
2. Встановлення бажаного діапазону частот, на яких матеріал повинен ефективно поглинати звук;
3. Використання розробленого інверсного методу для визначення опору повітряному потоку пористого матеріалу, що підбирається;
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;

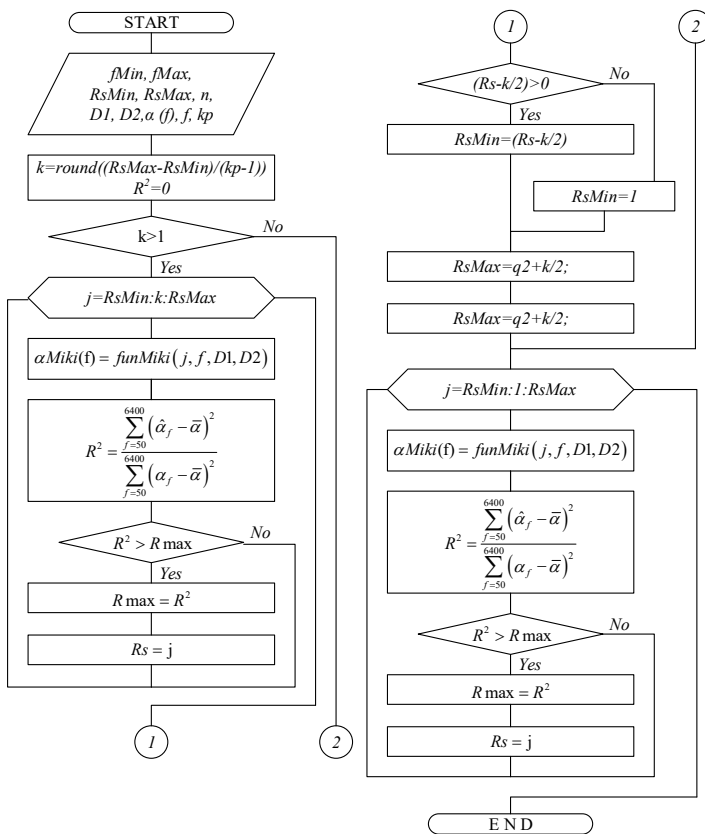


Рис. 25 Алгоритм роботи інверсного методу визначення опору потоку повітря

6. Перевірити підбраний матеріал в реальних умовах або на спеціалізованих тестових стендах.

Для матеріалу необхідно задати файл із необхідними коефіцієнтами поглинання для відповідних частот та встановити, у якому діапазоні можна міняти товщину матеріалу. У нашому випадку на 20 мм, як показано на рис. 26. Запустивши на виконання натиском кнопки Підібрати Rs, підбираємо матеріал із заданими характеристиками. Результат показано на рис. 27. У даному випадку синьою лінією на графіку показано коефіцієнт звукопоглинання, який ми хочемо отримати, а червоною – характеристику, яку матиме підбраний матеріал товщиною 29,7 мм та опором потоку повітря 4954 Па·с/м<sup>3</sup>.

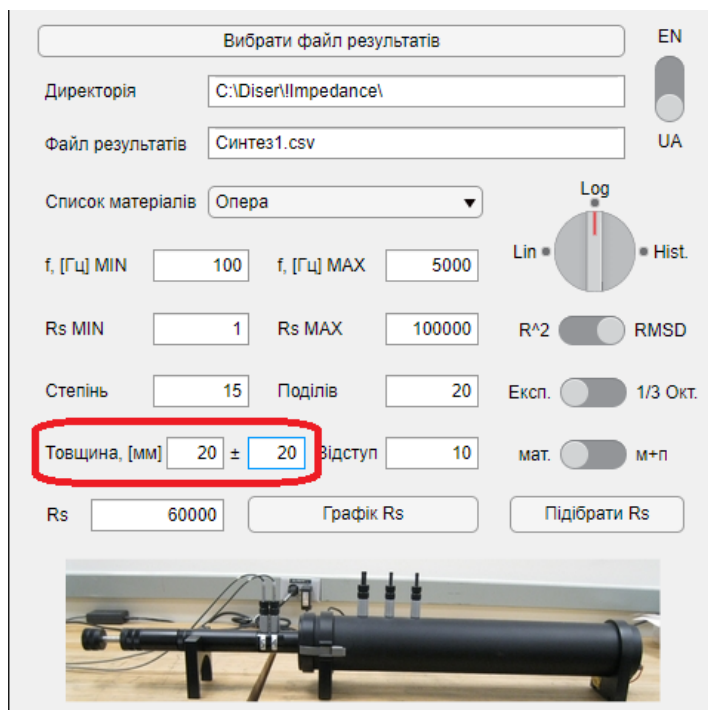


Рис. 26. Добір товщини матеріалу

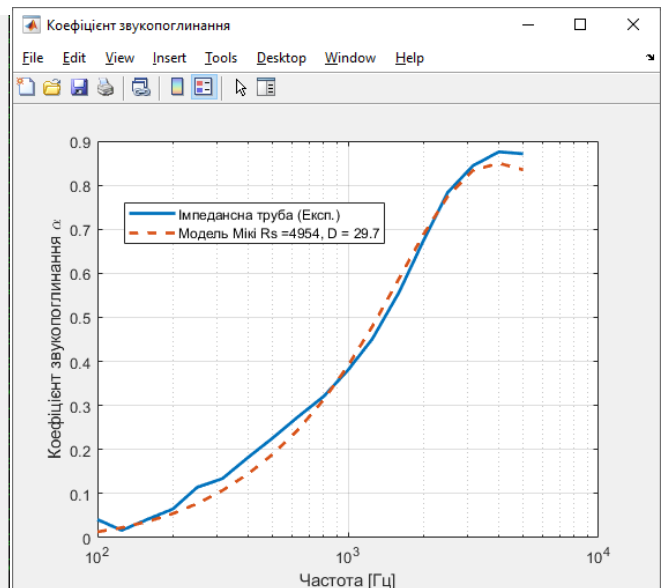


Рис. 27. Результати синтезу матеріалу з доборою товщини, що відповідає заданим характеристикам звукопоглинання

У сьомому розділі досліджено алгоритмічну та архітектурну основи розроблення автоматизованих систем для добору акустичних параметрів та матеріалів. Представлено основні етапи роботи таких систем: збір даних, їх обробка, акустичне моделювання, автоматизоване формування рекомендацій, інтеграція з реальними проектами та врахування інновацій.

Запропоновано модульну архітектуру системи (рис. 28), яка включає:

- Рівень даних з базами матеріалів, параметрів та методик;
- Рівень логіки застосунку, що містить модулі аналізу, моделювання та рекомендацій;
- Рівень інтерфейсу користувача для взаємодії з кінцевими користувачами;
- Інтеграцію з вимірювальними інструментами;
- Модуль безпеки.

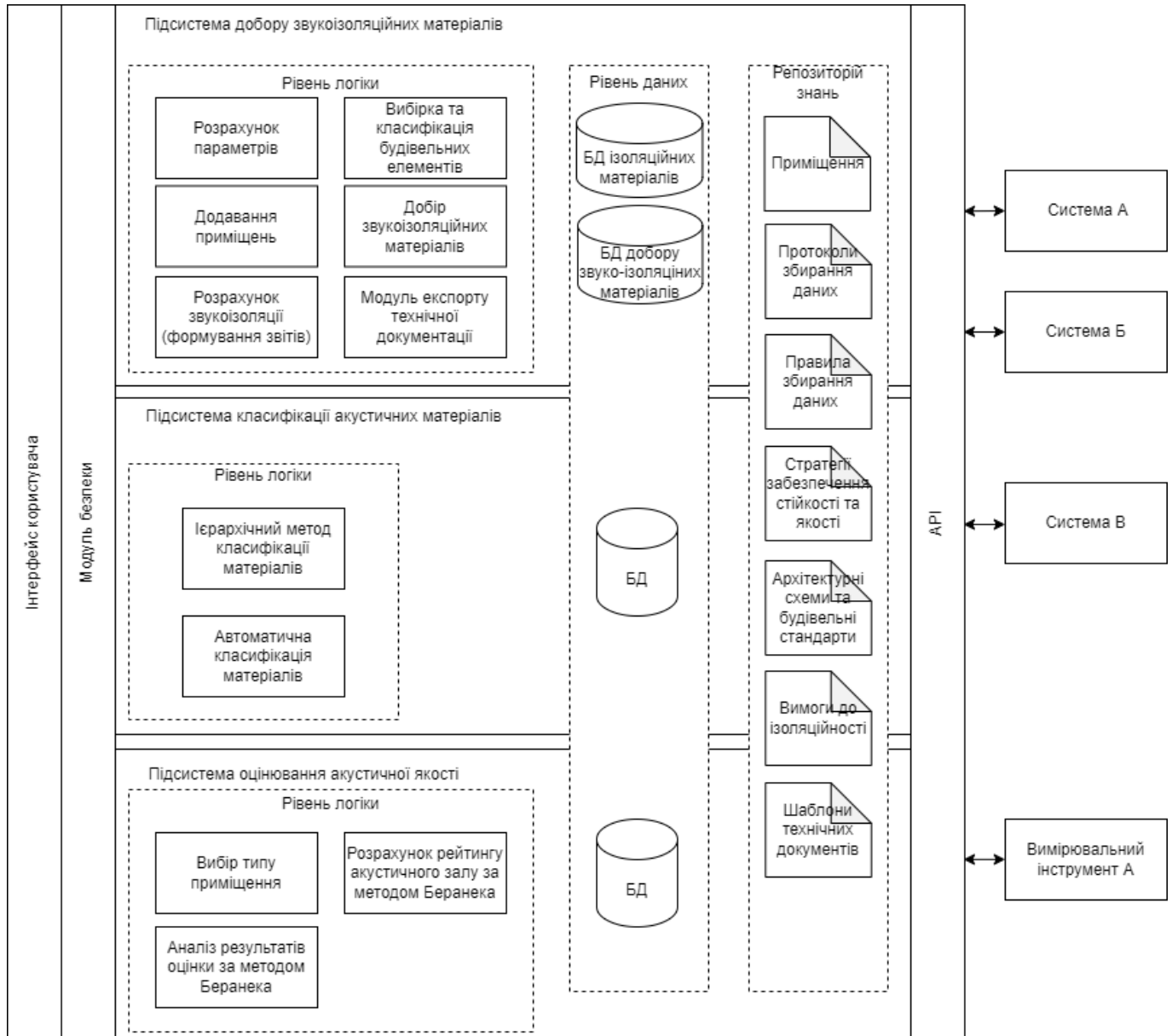


Рис. 28. Архітектура системи

Розроблено інформаційні моделі для підсистем, зокрема для класифікації акустичних матеріалів. Ці моделі враховують специфіку матеріалів, стандарти ДСТУ та забезпечують оптимізацію вибору матеріалів залежно від їхніх акустичних властивостей.

Визначено специфічні вимоги до систем автоматизації в акустиці, такі як інтеграція з CAD-системами, застосування методів штучного інтелекту, тривимірне моделювання звукових полів і відповідність високим стандартам точності. Особливу

увагу надано розробленню баз даних та класифікації матеріалів, що забезпечують ефективність, інтеграцію і сталий розвиток проєктів.

Розроблено та реалізовано алгоритм автоматизованої класифікації акустичних матеріалів, блок-схему якого зображено на рис. 29. Основа алгоритму полягає у встановленні класу звукопоглинання для кожного з трьох частотних діапазонів на основі величини середньоарифметичного коефіцієнта ревербераційного звукопоглинання. Впровадження цього підходу у базу даних надасть можливість проєктувальникам ефективно відібрати матеріали за класом звукопоглинання.

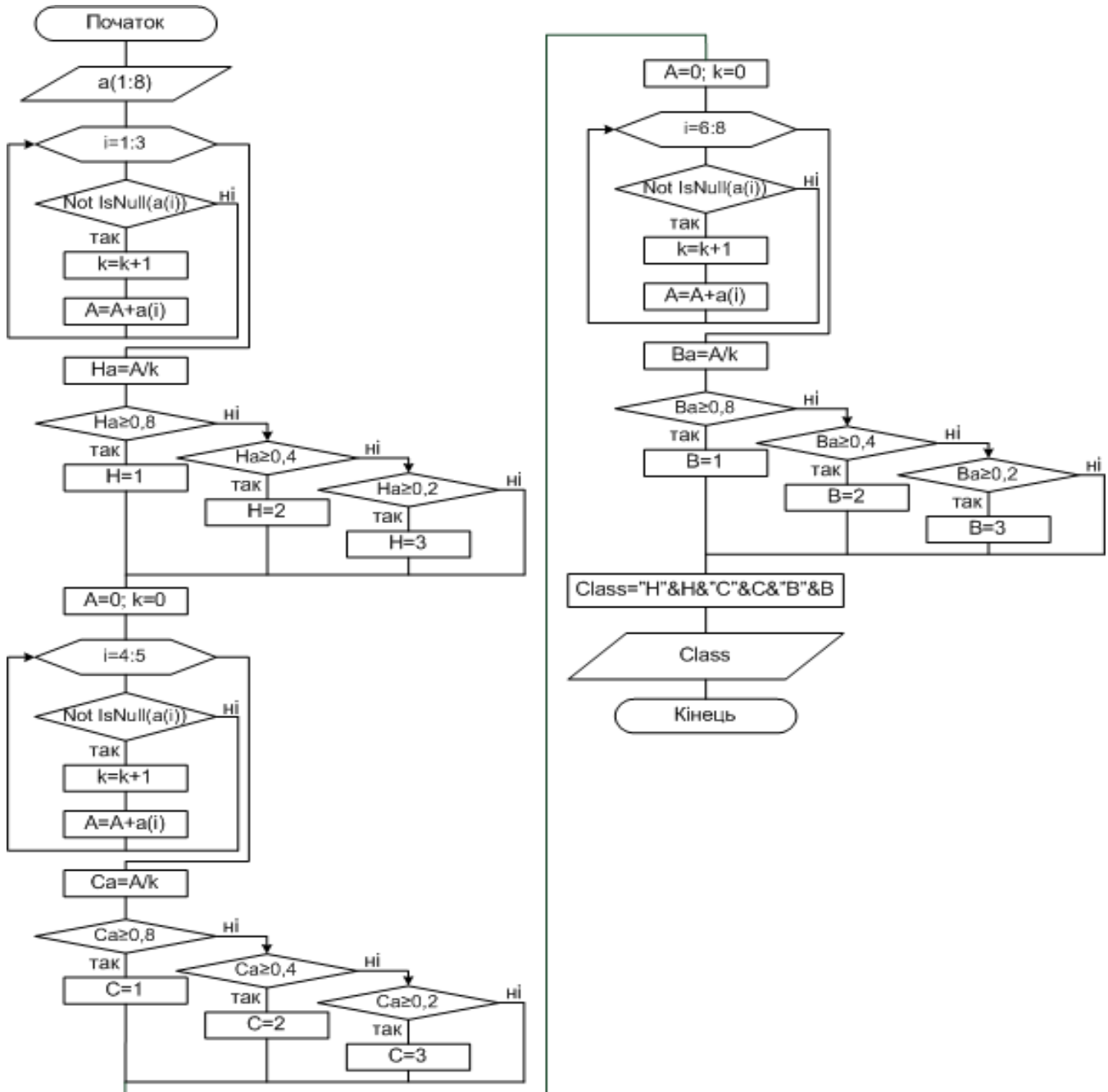


Рис. 29. Блок-схема алгоритму автоматичної класифікації матеріалів відповідно до ДСТУ Б В.2.7-183

Комплексний процес класифікації акустичних матеріалів, який застосовували під час створення інформаційної моделі бази даних акустичних матеріалів, подано на рис. 30.



Для підсистеми автоматизованого добору звукоізоляційних матеріалів розроблено дві бази даних: базу даних ізоляційних матеріалів і базу даних підтримки процесу добору звукоізоляційних матеріалів.

Під час проєктування бази даних ізоляційних матеріалів здійснено детальний аналіз звукоізоляційних матеріалів на предмет їх ієрархізації, що дало змогу зменшити розмірність бази. Розроблено логічну модель даних, яка відображає 4 рівня ієрархії (рис. 31).

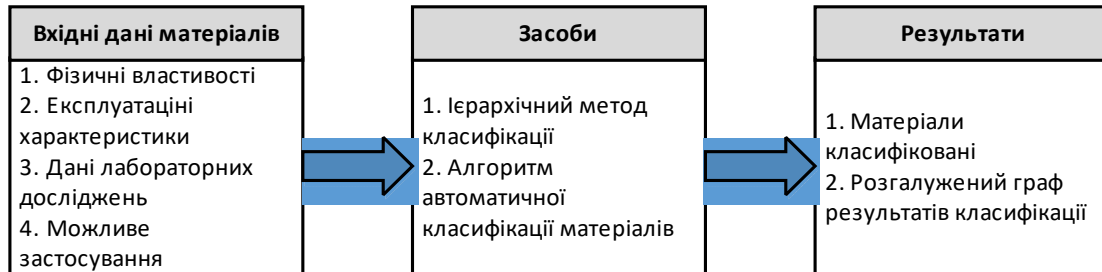


Рис. 30. Процес класифікації матеріалів

Під час проєктування бази даних підтримки процесу добору звукоізоляційних матеріалів здійснено детальний аналіз будівельних норм, після чого спроектовано необхідні таблиці та логічну модель даних (рис. 32) для збереження даних про допустимі рівні шуму, нормативні значення індексів ізоляції та багато інших.

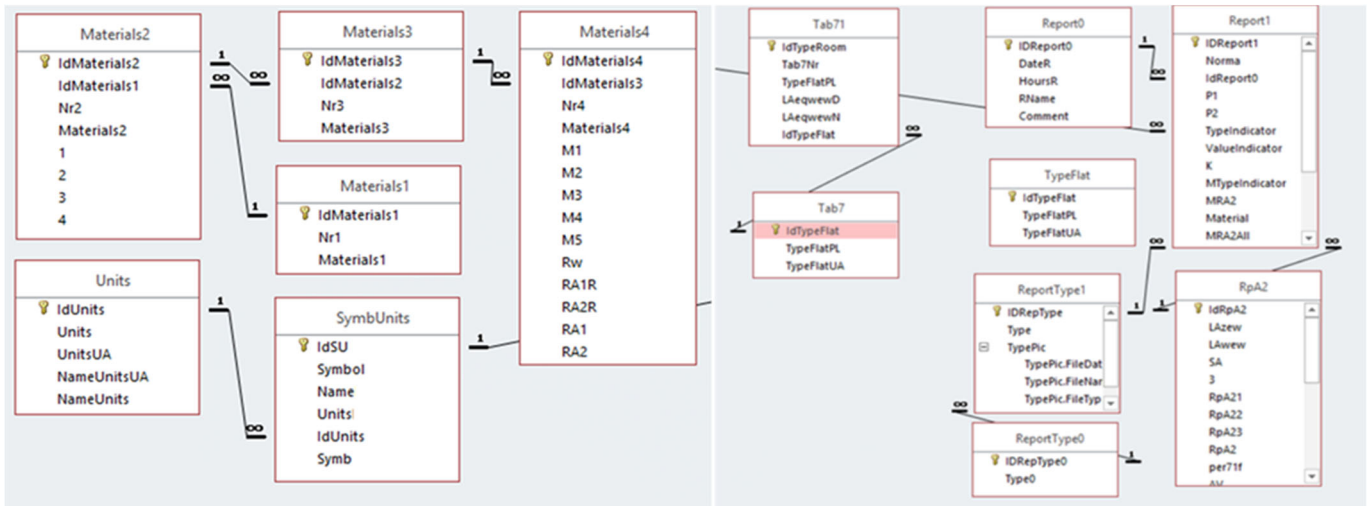


Рис. 32. Логічна модель даних

Розроблена підсистема складається із таких модулів: внесення даних про звукоізоляційні матеріали, автоматичний розрахунок інших звукоізоляційних параметрів, вибірку та автоматичну класифікацію будівельних елементів (вікон, дверей, тощо) за різними класами звукоізоляційності, додавання нових приміщень, добір необхідних звукоізолюючих матеріалів за заданими критеріями, розрахунок звукоізоляції, формування звітів.

У підсистемі проводиться перевірка чи це зовнішня чи внутрішня конструкція. Залежно від типу конструкції використовуються різні модулі розрахунку. Для долучення даного проєкту до конструкторської документації архітектора необхідно, щоб звіт формувався 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. Для швидкого доступу до відповідних груп матеріалів розроблено інтерфейс користувача (рис. 33).

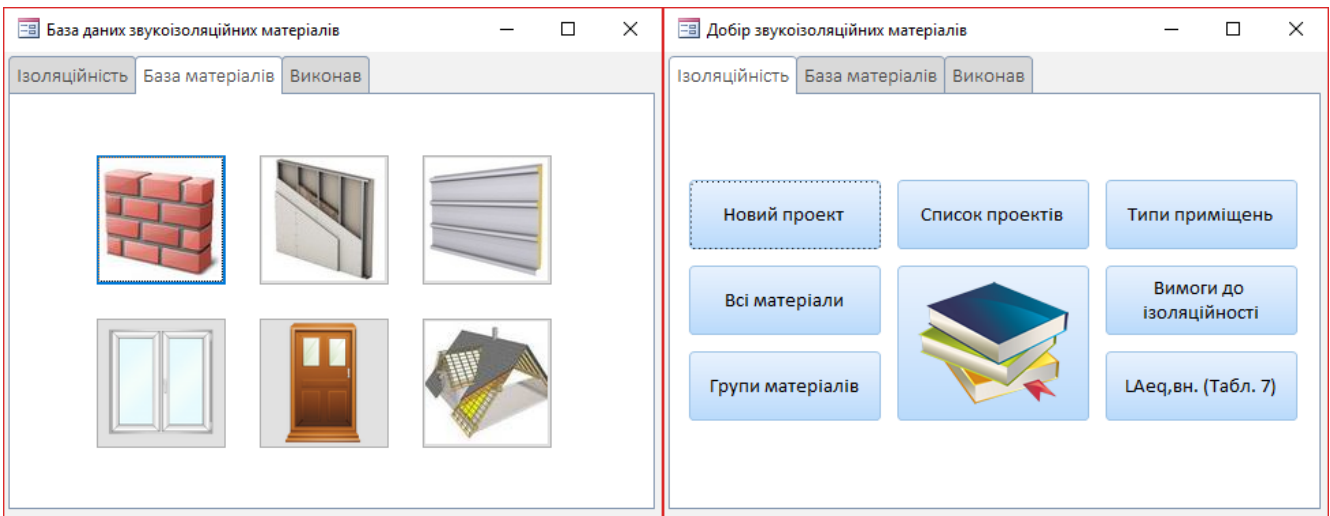


Рис. 33. Головне вікно підсистеми

ID	Дата	Година	Назва проекту	Коментар
4	23.01.2018	17:26:21	Проект	ver. 3

Тип приміщень	Пр. №1	Пр. №2	Назва перегородки
Зовнішнє вікно	кімната		
$R'w$	= 52 [dB]	$K = 2$ [dB]	$Rw = 33$ [dB] All <input type="checkbox"/> RA,1,R=30,
згідно. ДБН-В.1.1-31 табл. 3. Лр. 26. Житлові будинки: Стіни і перегородки між житловими при			
[4.1.2.2] Однорамне вікно та балконні двері системи SKJ-94 ламінованого соснового дерева			
відповідно до АТ-15-3584 / 2005: Однокімнатні вікна та балконні двері системи SKJ-94,			
Зовнішні двері	кафе	кухня	
$R'w$	= 32 [dB]	$K = 2$ [dB]	$Rw = 36$ [dB] All <input type="checkbox"/> RA,1,R=34,
згідно. ДБН-В.1.1-31 табл. 3. Лр. 29. Житлові будинки: Вхідні двері квартир, що виходять на схо			
[5.1.5.1] внутрішні двері DWA та DPA системи Sokulka відповідно до АТ-15-4941 / 2008			
(одношарові): двері з порогом DWA та DPA, обшивка фібрових дощок; рама: дерев'яна або			
Перекриття	кімната	гараж	
$L'n,w$	= 60 [dB]	$K = 2$ [dB]	$L'n,w = 64$ [dB] All <input type="checkbox"/> RA,1,R=52,
згідно. ДБН-В.1.1-31 табл. 3. Лр. 3. Житлові будинки: Перекриття між приміщеннями квартир і			
Внутрішні двері	кімната	коридор	двері 2
$R'w$	= 32 [dB]	$K = 2$ [dB]	$Rw = 37$ [dB] All <input checked="" type="checkbox"/> RA,1,R=35,
згідно. ДБН-В.1.1-31 табл. 3. Лр. 105. Навчальні заклади: Вхідні двері із загального коридора в н			
[5.3.13.2] Двері вогнетривкі PONZIO NT 78 Елементи з алюмінієвими профілями з			
термічними перервами відповідно до ДБН-15 7540/2008: Двері без порогу; наповнення			
*			

Рис. 34. Добір ізоляції конструкцій поточного проекту

Детальний перегляд інформації для конкретної конструкції відбувається через створені картки матеріалу чи звукоізолюючої конструкції. Для початку роботи над проектом необхідно вибрати варіанти конструкцій. Для одного проекту можна використовувати потрібні конструкції необмежену кількість раз. Основна задача віконної форми (рис. 34), визначити, яка має бути ізоляційність і дібрати матеріали з такою ж або більшою ізоляційністю. У програмі здійснюється перевірка чи це зовнішня перегородка чи внутрішня, бо залежно від цього відкриваються інші форми для розрахунку.



У **восьмому розділі** розглянуто апробації методів акустометрії, розроблених у межах дисертаційної роботи, що включає створення, калібрування, моделювання та експериментальне дослідження акустичних властивостей закритих приміщень різного призначення. Наведено комплексні методи аналізу, перевірки та вдосконалення акустичних характеристик об'єктів з використанням сучасних інструментів моделювання та експериментальних досліджень.

Розроблено модель конвертера для інтеграції систем SketchUP і Catt-Acoustic, метод автоматизованого добору коефіцієнтів звукопоглинання для калібрування моделей, а також проведено дослідження поширення звукових хвиль. Виконано експериментальні дослідження часу реверберації для різних типів приміщень, включно з сакральними об'єктами, театрами й аудиторіями, проаналізовано їх акустичні параметри до і після модернізації. 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, що забезпечує спрощення процесу переносу геометричних моделей приміщень.

Для автоматизації задання звукопоглинаючих та звукорозсіюючих властивостей матеріалів запропоновано метод, ідея якого полягає в автоматичному заданні

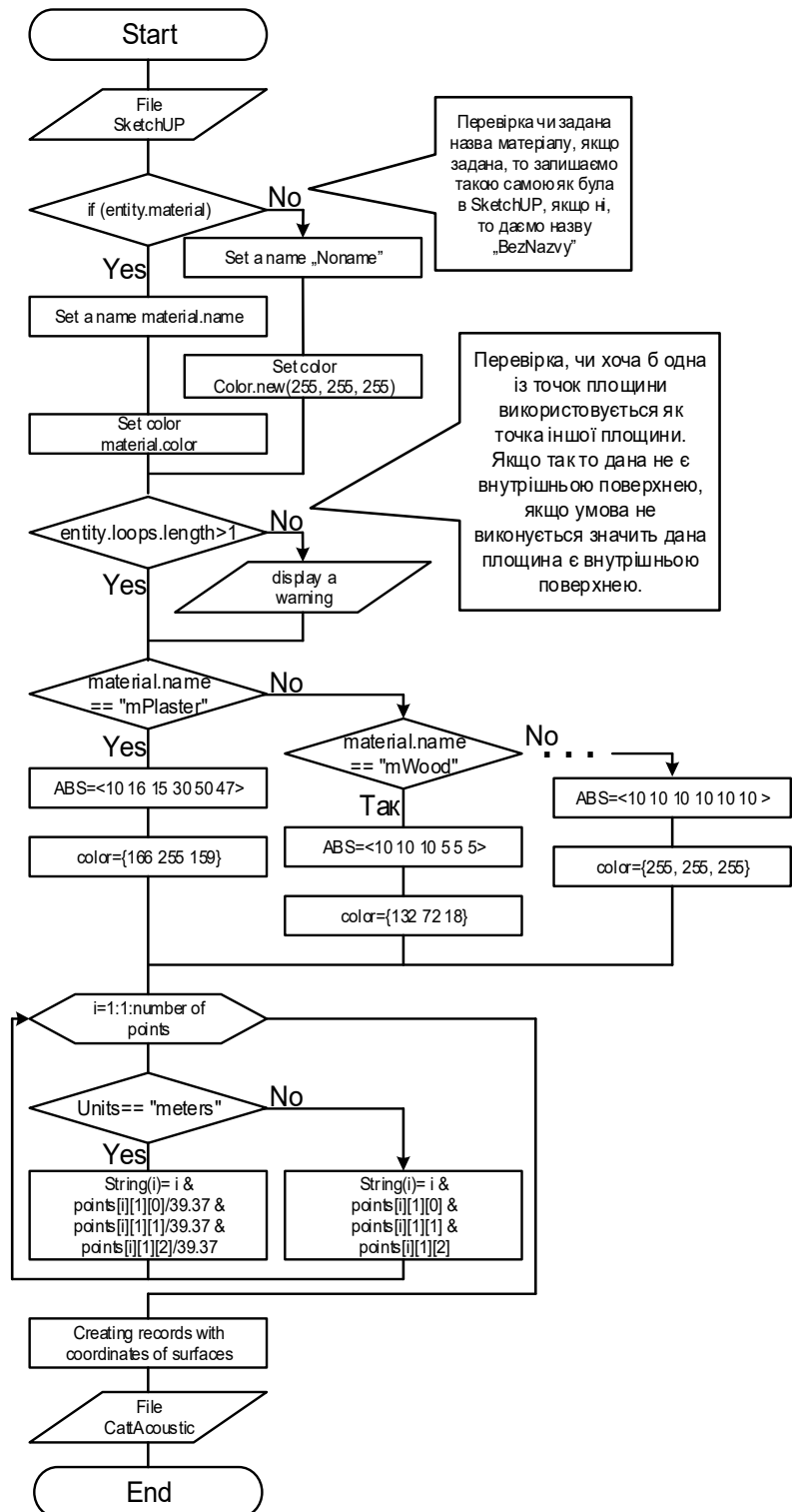


Рис. 35. Блок-схема алгоритму роботи конвертера

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, кольору матеріалу та геометрії. Розроблено математичне забезпечення моделі конвертера, блок-схему функціонування якого подано на рис. 35.

Під час розроблення конвертера передбачено перевірку на помилки, а саме, якщо хоча б одна з 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. На основі запропонованих рішень алгоритмів та блок-схем розроблено програму конвертера на мові Ruby.

Розроблено метод автоматизованого добору коефіцієнтів звукопоглинання для калібрування моделей. Пропонується задача підбору, тобто розрахувати, які мають бути коефіцієнти затухання матеріалу, щоб отримати необхідний час реверберації, а вже після цього підбирати матеріал, який відповідає заданим критеріям коефіцієнтів поглинання. Для автоматизації цього процесу запропоновано новий метод, основні кроки якого, наступні:

1. Визначення у програмі САТТ-Acoustic відсоткової частки всіх типів поверхонь;
2. Вибір тільки тих поверхонь, площа, яких впливає на об'єм приміщення (крісла, лавки не впливають на об'єм приміщень - відповідно їхні площі не враховуються);
3. Новий перерахунок відсоткової частки різних поверхонь без врахування поверхонь, які не впливають на об'єм;
4. Визначення із запропонованої залежності коефіцієнтів поглинання звукової енергії для необхідних октавних чи 1/3 октавних частотних смуг.

Час реверберації  $T$  можна визначити з формули Сабіна:

$$T = \frac{0,161V}{A} = \frac{0,161V}{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i},$$

де  $V$  – об'єм приміщення,  $S_i$  – площа  $i$ -ї поверхні,  $\alpha_i$  – коефіцієнт поглинання  $i$ -ї поверхні. Використовуючи формулу Сабіна 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 отримаємо:

$$\alpha = \frac{0,161 \cdot V_s \cdot p_s}{T \cdot S},$$

де  $p_s$  – відсоткова частка поверхні, коефіцієнти поглинання якої добираються;  $\alpha$  – шуканий коефіцієнт поглинання,  $V_s$  – об'єм приміщення,  $T$  – бажаний час реверберації,  $S$  – площа поверхні, до якої добирається коефіцієнт поглинання.

Інформація про площу поверхонь та їх процентну частку відносно всіх поверхонь отримується з програми САТТ-Acoustic.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА 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 проектування 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 UC та Індустріального Інтернету Речей ПоТ. По-друге, це подальший розвиток наукових підходів інформаційно-вимірювальних 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 проектуванні 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 (P-зонд), та MEMS теплових сенсорів потоку, що виконують функцію вимірювального перетворення швидкості потоку (U-зонд) повітря.

5. Обґрунтована 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 імпедансної 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 ОСНОВНИХ 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.

5. Banaś M., Pytel K., Kosobutsky 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., Kernytsky A., Zdobytzkyi 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., Kernytsky 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 І. 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 І. 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., Orynychak 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., Kernyskyu 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., Камісінські 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., Kernyskyu 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., Kernyskyu 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 T20. Комп’ютерні технології друкарства. 2017. № 1 (37). С. 102–109.

24. Melnyk M., Kernyskyu 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 напрямку, 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., Kernyskyy A., Lobur M. Comparison of methods for measuring reverberation time. *Machine Dynamics Research*. 2018. Vol. 42, No. 2. P. 27–34.

32. Melnyk M., Kernyskyy 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., Matviykyv 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., Orynychak 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., Matviykyv 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. Orynychak 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. Matviykyv 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., Matviykyv 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 absorption 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 Radioelectronics, 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., Kernyskyy 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., Kernyskyy 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, Kernyskyy 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., Kernyskyy A., Szermer M., Zajac P., Zabierowski W. Application of a genetic algorithm for dimension optimization of the MEMS-based 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. Kernyskyy 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 Zdobyt'skyj, 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 Orynychak, 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 Bartłomiej, 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., Kernyskyy 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. Matviykyv, 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., Kernyskyy 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., Kernyskyy 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., Kernyskyy 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.

## АНОТАЦІЇ

**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 проєктувальних робіт. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2025.

У дисертації вирішено цілісну науково-прикладну проблему розроблення та інтеграції методів, моделей та апаратно-програмних засобів акустометрії для забезпечення високої точності вимірювання та аналізу акустичних характеристик приміщень з урахуванням сучасних вимог концепцій повсюдного комп'ютингу та промислового інтернету речей. 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 імпедансної труби та лабораторної установки продуванням потоком повітря пористих матеріалів. Розроблено 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 подальшої обробки. Розроблено 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. Розроблено 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 проектування (Domain-Driven Design) комп'ютерних систем акустометрії відповідно до концепції UC. Розроблено метод оптимізації перетворення сигналів, який забезпечує оптимізацією ширини імпульсу активуючих звукових коливань за критеріями параметрів поширення сигналу в досліджуваному середовищі, що дає змогу реалізувати автоматизовані системи проектування засобів акустометрії на основі завадостійкого векторного імпульсно-частотного зондування приміщень. Розроблено метод синтезу імітаційних сигналів, який базується на SPICE макромоделях перехідних процесів, що дає змогу реалізувати системи автоматизованого проектування апаратно-програмних засобів акустометрії з розширеними можливостями, зокрема для машинного навчання з використанням нейронних мереж у задачах дослідження акустичних параметрів у приміщеннях із значним фоновим шумом та метод комплексної верифікації процесів та засобів дослідження акустичних параметрів приміщень, який поєднує етапи аналізу інформативності сигналів, впливу акустичного шуму, нелінійних спотворень, коректності ходу вимірювання та якості калібрування, що дає змогу забезпечити комплексність та достовірність функціонування комп'ютерних систем акустометрії та їх автоматизованого проектування. 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 (P-зонд) та швидкості потоку (U-зонд) повітря, що дає змогу реалізувати системи автоматизованого проектування комплексних засобів акустометрії з функцією параметричного аналізу процесів формування інформативних сигналів електричного та акустичного імпедансів та метод структурно-функціонального синтезу вбудованої системи акустометрії на основі селективного підсилення заряду, який на відміну від

відомих, поєднує кореляційне (мультиплікативне) перетворення та квадратурне (знакове) 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 використовуючи формулу Сабіна і дає змогу за одну ітерацію досягнути точність визначення часу реверберації до 0,5 с.

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.

Також удосконалено 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.

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

**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.

The dissertation tackles the complex scientific and practical problem of developing and integrating methods, models, and hardware-software tools for acoustometry. This ensures high accuracy in measuring and analyzing the acoustic characteristics of rooms in line with modern standards set by Ubiquitous Computing and the Industrial Internet of Things.

An innovative method for determining the airflow resistance of porous materials was developed using the Mikí model. This method simplifies the representation of sound absorption coefficients across the audible frequency spectrum to a single value – air flow resistance. This allows for the measurement's comparison from different setups such as an impedance tube and a laboratory setup using airflow through porous materials. Further, an information model for an automated system was developed to select sound insulation materials. This model integrates a comprehensive database of acoustic materials and supports automatic classification, facilitating adaptive material selection based on construction requirements, building codes, and room type. This approach enhances the

system's flexibility, and scalability, and automates the data export process for further analysis.

A converter model was also introduced to streamline the export of room geometric models from the SketchUp system to the Catt-Acoustic system, with an automatic assignment of material sound absorption coefficients. This boosts the efficiency of modeling and ensures consistency of data across systems. A vector impulse-frequency room probing method was developed, generating vector-directed, single-frequency sound vibration impulses. The detection uses correlation and auto-correlation methods for frequency selection, laying the groundwork for the domain-driven design of computer-based acoustometry systems aligning with the UC concept. A method to optimize the signal conversion process was devised to refine the width of activating sound vibration impulses based on signal propagation parameters in the probed medium. This advances the development of automated acoustometry instrument design systems based on robust vector impulse-frequency room probing. Moreover, a technique for synthesizing simulated signals using SPICE macromodels of transient processes is created. This implementation supports the automated design of advanced hardware-software acoustometry tools, utilizing machine learning and neural networks to assess acoustic parameters in noisy environments. A comprehensive method for verification integrates signal informativeness analysis, acoustic noise impact, non-linear distortions, measurement accuracy, and calibration quality, ensuring the thoroughness and reliability of computer-based acoustometry systems and their automated design. The electro-thermal analogy method was advanced for synthesizing electro-acoustic models of acoustometry measurement transducers. This novel approach integrates a single MEMS macromodel structure for measuring pressure and airflow velocity, facilitating the development of complex, automated acoustometry instruments that can perform parametric signal analysis. Furthermore, a structural-functional synthesis method for an embedded acoustometry system was established using selective charge amplification. It combines correlation conversion and quadrature detection within a programmable system on a chip, offering robust interference resistance during low-frequency vibration parameter measurement. The method of selecting sound absorption coefficients in the Catt-Acoustic system using the inverse determination of coefficients with the Sabine formula was improved. This yields a reverberation time measurement accuracy of up to 0.5 seconds in a single iteration. The method for measuring air flow resistance was refined to enhance accuracy and repeatability by correlating airflow velocity with pressure differential, selected through linear approximation. Lastly, the method of acoustic materials selection was enhanced to accurately determine the optimal thickness and airflow resistance to porous materials, aiming to achieve desired sound absorption coefficients across specified frequency ranges.

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