

До спеціалізованої вченої ради  
Д 35.052.05 при Національному  
університеті «Львівська політехніка»  
079013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12

## ВІДГУК

офіційного опонента, д.т.н., професора **Корнаги Ярослава Ігоровича**  
на дисертаційну роботу **Мельника Михайла Романовича**  
на тему: **«Моделі, методи та засоби дослідження та покращення  
акустичних властивостей закритих приміщень»**,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.13.12 - системи автоматизації проектувальних робіт

### 1. Актуальність теми дослідження

Дослідження й аналіз акустичних властивостей закритих приміщень є одним із ключових аспектів при створенні комфортного середовища у житлових, робочих, культурних, освітніх або будівлях спеціального призначення. Однією з найбільших проблем у цій сфері є досягнення збалансованого акустичного середовища у зв'язку зі зростаючими вимогами до звукоізоляції, розбірливості мовлення, мінімізації шуму та якості відтворення аудіоматеріалів.

Розвиток цифрових технологій і концепцій, таких як повсюдний комп'ютинг (Ubiquitous Computing), Інтернет речей (IoT), адаптивна акустика, а також автоматизовані системи проектування (САПР), підкреслює нагальність удосконалення методів акустометрії. Це актуально для проектування та обслуговування сучасних приміщень із підвищеними вимогами до акустики.

Дисертаційне дослідження Мельника Михайла Романовича якраз і спрямоване на вирішення цієї задачі — через розробку моделей, методів і засобів аналізу та вдосконалення акустичних характеристик. Інтеграція



нових підходів, зокрема SPICE-моделювання, інформаційних моделей і програмних засобів, робить роботу надзвичайно актуальною для сучасних потреб цифрового світу.

## **2. Загальна характеристика дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота складається зі вступу, восьми розділів, узагальнених висновків, списку використаних джерел (350 найменувань) та додатків. Основний обсяг роботи становить 347 сторінок (рагальний обсяг - 423 сторінки), включаючи 378 рисунків і 22 таблиці. Робота написана чітко й зрозуміло, всі положення логічно викладені й підкріплені широким переліком практичних результатів, що представлені в численних ілюстраціях, моделях і формулах.

У роботі розглядаються як теоретичні аспекти дослідження, так і вирішення прикладних задач, що дозволяє повноцінно оцінити якість та ефективність нових методів. Дисертаційне дослідження орієнтоване на виконання складних інженерних задач, пов'язаних із аналізом та оптимізацією акустичних характеристик приміщень.

## **3. Змістовний аналіз дисертації**

Дисертаційне дослідження Мельника Михайла Романовича ґрунтується на системному аналізі сучасних наукових і практичних розробок у сфері дослідження та удосконалення акустичних характеристик закритих приміщень. У роботі чітко визначена сукупність завдань, спрямованих на розв'язання ключових проблем, пов'язаних із розробкою новаторських методів, моделей і засобів для оптимізації акустичного середовища. Результати дослідження сприяють підвищенню якості звукового середовища у приміщеннях різного призначення, таких як театри, концертні зали, офісні простори, навчальні аудиторії та житлові будівлі.

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження, сформульовано його мету та завдання, визначено наукову новизну, практичне значення результатів і зв'язок роботи з державними програмами. А також викладено апробацію матеріалів дисертації в рамках міжнародних конференцій та публікацій у провідних фахових виданнях.

## **Розділ 1. Сучасні методи і моделі дослідження акустичного простору.**

У першому розділі дисертації здійснено системний аналіз сучасних методів моделювання акустичних процесів у закритих приміщеннях. Представлено класифікацію параметрів, що визначають акустичну якість, з акцентом на частотні характеристики, акустичний імпеданс, показники дисперсії, реверберації та розбірливості. Описано методи експериментального й чисельного визначення цих параметрів, що використовуються у практиці акустичного проектування.

Визначено переваги та недоліки існуючих підходів, включаючи моделі, орієнтовані на часову область, SPICE-аналогове моделювання та сенсорні системи вимірювання. Обґрунтовано необхідність переходу до формального моделювання у контексті автоматизації проектувальних рішень і розвитку CAD-середовищ. Узагальнено структурну схему дослідження і виділено ключові напрямки, реалізовані в подальших розділах роботи.

## **Розділ 2. Основні підходи, методи та рішення.**

У другому розділі представлено нові методи зондування, зокрема векторного імпульсно-частотного зондування приміщень. Детально описані алгоритми формування сигналів, методика просторово-частотної селекції та функції оптимізації тривалості імпульсів. Автором запропоновано функцію оптимізації тривалості імпульсів на основі критеріїв просторової роздільної здатності, частотної селективності та завадостійкості, що дозволяє адаптувати параметри зондування до характеристик об'єкта дослідження. Також обґрунтовано постановку задач параметричного аналізу сигнальних трактів і представлено структуру імітатора віртуальних сигналів Data@Sim, що дозволяє генерувати експериментальні дані за різними сценаріями.

## **Розділ 3. Електро-акустичні SPICE макромоделі.**

Третій розділ присвячено розробці SPICE макромоделей для сигнальних трактів систем акустометрії. Автор розглянув методи синтезу моделей перетворення електричного й акустичного сигналу, інтегрувавши



їх у єдину макромодель (MEMS мікрофони та теплові сенсори). Особливу увагу приділено заміщенню характеристик цих параметрів у схемах та демонстрації їх результатів у вигляді діаграм частотних характеристик. Запропоновано п'ятиетапний алгоритм побудови макромоделі з урахуванням статичних та динамічних характеристик MEMS сенсорів, теплових релаксаційних процесів, нелінійних функцій перетворення та джерел шумів. Усі моделі адаптовані до середовища SPICE, що дозволяє застосовувати їх у проектуванні аналогових фронт-ендів. Наведені приклади схем заміщення підтверджують ефективність та універсальність запропонованого підходу для застосування в системах автоматизованого проектування.

#### **Розділ 4. Моделі сигнальних трактів систем акустометрії.**

У четвертому розділі представлено інженерно орієнтовану модельну базу для аналізу та оптимізації сигнальних трактів у системах акустометрії. Автором запропоновано структурний підхід до побудови SPICE макромоделей основних компонентів — фільтрів, інтеграторів, шумових джерел, кореляційних блоків — із врахуванням нелінійностей, паразитних ефектів і спектральних спотворень.

Особливої уваги надано оптимізації ширини імпульсів WP як ключового параметра, що визначає баланс між просторовою роздільною здатністю та завадостійкістю. Методика базується на аналізі реакцій моделі в умовах змінних характеристик завад, ілюстрована прикладами АЧХ та поведінки фільтрів у широкому діапазоні частот. Запропоновано підхід до кількісної оцінки похибок та обґрунтовано перевагу кореляційного аналізу у задачах високоточної акустометрії.

#### **Розділ 5. Методи підвищення якості акустичних характеристик закритих приміщень.**

У цьому розділі викладено технічні засоби і методи, спрямовані на удосконалення реверберації й мінімізацію шуму в закритих приміщеннях. Подано інженерно-обґрунтований підхід до організації експериментальних досліджень у сфері акустики приміщень. Автор запропонував Автором реалізовано апаратно-програмну систему AMES на основі мікроконтролера



PSoC із вбудованими компонентами аналогово-цифрового перетворення, цифрової фільтрації та програмованої генерації сигналів, розглянув механізми роботи SPICE макромоделей і обґрунтував метод комплексної калібровки систем акустометрії. Описано схеми підсилювачів заряду, структурну реалізацію сигналового тракту, моделі впливу паразитних елементів і способи компенсації нестабільностей.

Проведено моделювання SPICE-сумісних підсилювальних каскадів, реалізовано параметричний аналіз та осцилографічний контроль. Запропоновано алгоритм верифікації достовірності вимірювань із урахуванням шумів, фазових спотворень, нелінійності та частотної роздільності. Розділ містить широкі можливості практичного застосування в задачах технічної акустики та проектування компактних вимірювальних пристроїв.

## **Розділ 6. Інформаційна технологія побудови акустичних характеристик закритих приміщень.**

Представлено процес розробки систем автоматизованого добору матеріалів із заданими параметрами звукопоглинання через моделювання в рамках платформ SketchUP та CATT-Acoustic. Представлено методично вивірений та технічно реалізований підхід до визначення опору повітряному потоку в пористих середовищах. Проведено глибокий аналіз метрологічних особливостей традиційних методів (імпедансна труба, ревербераційна камера) та запропоновано їх альтернативу — автоматизований стенд для продування повітря з реалізацією прецизійного обліку витрати і тиску.

Вперше обґрунтовано і реалізовано метод PLA, який забезпечує лінійне апроксимування нелінійної залежності між потоком і опором. Проведено аналітичну і експериментальну верифікацію точності на прикладі широкого набору матеріалів. Автором також розроблено інверсний алгоритм на основі моделі Мікі, доповнений чутливим аналізом і реалізований у MATLAB. Ці рішення мають високу прикладну цінність для синтезу покриттів та вибору акустичних матеріалів в умовах

CAD-аналізу. Особливу увагу автор приділив автоматизованій оптимізації матеріалів і їх характеристик за нормативними документами.

## **Розділ 7. Програмні засоби побудови та підвищення якості акустичних характеристик.**

У цьому розділі дисертації розроблено структурно-функціональну модель системи автоматизованого добору акустичних параметрів та матеріалів, яка включає класифікаційні алгоритми, бази даних акустичних і звукоізоляційних матеріалів, логіку взаємодії з користувачем та механізми інтеграції з системами CAD і документування. Представлено логічні моделі даних для кожної підсистеми, розроблені з урахуванням багаторівневої ієрархії, норм проектування і показників технічної якості.

Описано реалізацію методів автоматичної класифікації згідно з державним стандартом, алгоритм оцінювання акустичної якості приміщень за методом Беранека, а також логіку взаємодії програмних модулів, інтерфейсів і сховищ даних. Інженерно-орієнтований підхід до проектування програмного середовища засвідчує практичну доцільність впроваджених рішень у професійне середовище архітекторів, проектантів і акустиків.

## **Розділ 8. Апробація результатів дослідження.**

У завершальному розділі дисертації детально проаналізовано ефективність запропонованих методів і програмних засобів у реальних проектних умовах закритих приміщень. Автор розробив інженерно орієнтований інструментарій — зокрема, конвертер моделей із SketchUP до САТТ-Acoustic, механізм генерації геометрії, алгоритми присвоєння акустичних властивостей та автоматичного добору коефіцієнтів поглинання. Впровадження здійснено на прикладі різнопланових приміщень — від історичної синагоги до театру й сучасної аудиторії. Проведено як експериментальні вимірювання імпульсного відгуку (із застосуванням шумоміра SVAN 958A), так і чисельне моделювання. Результати моделювання продемонстрували високу відповідність експерименту, а похибка становила менше 5%, що підтверджує валідацію застосованих методів. Також проведено акустичну реконструкцію інтер'єру



церкви, аналіз STI та C80 до і після модернізації залу театру. Представлені дослідження свідчать про високий рівень практичної придатності розробленої системи.

#### **4. Наукова новизна роботи**

Наукова новизна роботи Мельника Михайла Романовича є однією з найбільших переваг дослідження. Серед основних наукових результатів можна виділити наступне:

1. Уперше створено модель автоматизованого конвертера з SketchUp у CATT-Acoustic, яка забезпечує експорт геометричних моделей із автоматичним призначенням коефіцієнтів звукопоглинання, що дозволило підвищити ефективність акустичного моделювання в CAD-середовищі.

2. Удосконалено метод добору коефіцієнтів звукопоглинання у системі CATT-Acoustic на основі зворотного визначення через рівняння Сабіна, що дало змогу виконати корекцію акустичної моделі за одну ітерацію з високою точністю.

3. Удосконалено метод добору акустичних матеріалів, який дозволяє підібрати товщину та питомий опір покриття на основі інверсного методу, що забезпечує необхідну частотну характеристику звукопоглинання.

4. Уперше запропоновано інформаційну модель добору акустичних матеріалів з автоматичною класифікацією, прив'язкою до норм, типу приміщення та експлуатаційних вимог, що дозволило уніфікувати підхід до підбору у CAD-системах.

5. Уперше реалізовано метод синтезу імітаційних сигналів на основі SPICE-макромоделей для проєктування апаратно-програмних засобів акустометрії з можливістю застосування у задачах машинного навчання;

6. Набув подальшого розвитку метод структурно-функціонального синтезу систем акустометрії із використанням принципів завадостійкого перетворення сигналів та реалізацією у PSoC-середовищі, що підвищило інженерну гнучкість та точність побудови систем.

Таким чином, отримані результати мають вагомe наукове значення та створюють підґрунтя для подальшого розвитку акустометрії.

#### **5. Практичне значення дослідження**

Практичне значення роботи підтверджується успішною реалізацією розроблених методик і моделей у різних проєктах. Найбільш значущими є наступні аспекти:

1. Удосконалення акустичних систем у Театрі ім. Марії Заньковецької в м. Львів, що призвело до покращення ревербераційного середовища й якості передачі звуку.

2. Інтеграція розроблених моделей у навчальний процес кафедри систем автоматизованого проєктування Національного університету “Львівська політехніка”.

3. Апробація моделей та методів у закладах міжнародного рівня, зокрема в Краківській Гірничо-металургійній академії.

4. Розробка автоматизованої системи добору матеріалів, що значно скорочує час проєктування акустичних середовищ і підбору матеріальних рішень.

Зазначені результати підтверджують масштаб і практичний вклад дисертаційної роботи в галузь акустики.

## **6. Обґрунтованість та достовірність результатів**

Обґрунтованість результатів дисертації базується на потужній теоретичній базі та проведенні багатofакторних експериментів. Розроблені SPICE моделі, симулятори та макромоделі детально протестовані та апробовані на практиці.

Автор продемонстрував високий рівень наукової підготовки й компетенції у використанні сучасних інструментів моделювання, таких як SPICE, FFT та інші. Усі представлені результати є достовірними, підтверджені візуалізацією, чисельними розрахунками та апробацією.

## **7. Публікації та апробація дослідження**

Результати дисертаційної роботи Мельника М.Р. відображено у значному обсязі наукових публікацій, зокрема: у 7 монографіях, 17 статтях у фахових виданнях України, 22 статтях у міжнародних або індексованих виданнях (Scopus, Web of Science), а також у 18 тезах доповідей на наукових конференціях. Такий обсяг публікацій повністю відповідає вимогам, що висуваються до дисертацій докторського рівня.



## **8. Зауваження до роботи**

1. У розділі про новизну роботи (зокрема, розробку SPICE моделей електро-акустичних компонентів) не завжди чітко розкрито відмінності запропонованих автором підходів від існуючих методів. Вказівка на основні переваги моделей у контексті попередніх розробок зробила б розділ більш інформативним.

2. Робота переважно фокусується на стандартних типах закритих просторів. Однак доцільно було б представити результати тестування методів у приміщеннях із нестандартними архітектурними характеристиками (наприклад, приміщення зі склепіннями або асиметричним зонуванням).

3. У роботі зазначено, що розроблені SPICE моделі пройшли апробацію. Проте відсутній докладний опис кількісних метрик та прикладів, які підтверджують точність та стабільність моделей у порівнянні з натурними експериментами.

4. У дисертації обґрунтовано проблему завад і шумів у вимірюванні, однак недостатньо детально розглянуто прийоми боротьби з високочастотними або низькочастотними завадами у реальних приміщеннях, що могла б зробити розробки більш універсальними.

5. У п'ятому розділі недостатньо деталізоване незалежне оцінювання точності вбудованих систем дослідження акустики приміщень, таких як AMES, порівняно з класичними методами та засобами досліджень (наприклад, використання систем типу REW).

6. У шостому розділі недостатньо висвітлено вплив нелінійних ефектів на точність вимірювання питомого опору повітряного потоку при низьких швидкостях повітряного потоку. При аналізуванні низьких швидкостей повітряного потоку спостерігається сильна нелінійність між питомим опором і швидкістю, що може впливати на точність методів екстраполяції, таких як лінійна регресія або PLA. Рекомендується більш детально дослідити ці аспекти, щоб уникнути потенційних похибок у реальних умовах.

7. У сьомому розділі недостатньо висвітлено аспект інтеграційної адаптації бази даних та розроблених підсистем для реального використання в уже існуючих комерційних або професійних CAD-системах. Незважаючи на можливість експорту даних до MS Excel і MS Word, в розділі недостатньо акцентовано увагу на повноцінній інтеграції в професійні системи проектування, що могло б значно підвищити ефективність і цінність розробленої системи для практичного використання в галузі проектування та будівництва.

8. У восьмому розділі недостатньо уваги приділено до валідації запропонованих інструментів (наприклад, конвертера SketchUP–Catt-Acoustic і методу автоматизованого добору коефіцієнтів звукопоглинання) через порівняння з іншими існуючими рішеннями, наприклад, EASE, ODEON тощо, або алгоритмами/методами, які використовуються в подібних випадках. Така оцінка могла б надати більш переконливу аргументацію щодо ефективності, точності та економічної доцільності розробки.

## **9. Висновок**

Наведені зауваження та побажання жодним чином не впливають на загальне позитивне враження від дисертаційної роботи Мельника М.Р. Дисертаційна робота Мельника Михайла Романовича «Моделі, методи та засоби дослідження та покращення акустичних властивостей закритих приміщень» є вагомим, завершеним науковим дослідженням, яке вирішує важливі теоретичні та практичні задачі в галузі акустометрії.

У представленій дисертаційній роботі відсутні результати кандидатської дисертації Мельника М.Р.

Дисертація та реферат Мельника Михайла Романовича цілком відповідають паспорту спеціальності 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт (Перелік наукових спеціальностей, затверджений Наказом Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України 14 вересня 2011 року № 1057) та профілю спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05.

На підставі проведеного аналізу дисертаційної роботи Мельника М.Р. «Моделі, методи та засоби дослідження та покращення акустичних



властивостей закритих приміщень» можна зробити висновок про те, що за актуальністю вирішеної науково-прикладної проблеми, отриманими науковими результатами і практичною цінністю вона відповідає вимогам МОН України щодо оформлення дисертацій (наказ МОН України №40 від 12.01.2017 разом зі змінами згідно наказу МОН України №759 від 31.05.2019) та пунктам 7 та 9 Постанови Кабінету міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197, а її автор Мельник Михайло Романович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.13.12 – системи автоматизації проектувальних робіт.

Офіційний опонент

Декан Факультету інформатики та

обчислювальної техніки,

професор кафедри інформаційних систем та технологій

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського»,

доктор технічних наук, професор

« 01 » квітня 2025 року



Ярослав КОРНАГА

Підпис Корнаги Я.І. засвідчую

Вчений секретар КПІ ім. Ігоря Сікорського



Валерія ХОЛЯВКО