

## **ВІДГУК**

### **офіційного опонента**

доктора технічних наук, професора,  
завідувача кафедри комп'ютерних наук  
Запорізького національного університету

**ШИЛО Галини Миколаївни,**

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

**Актуальність теми дослідження.** У наш час, коли технології стрімко розвиваються і вимоги до якості середовища стають все більш критичними, питання забезпечення комфортного акустичного середовища набуває особливого значення. Як у великих операційних залах театрів і концертних майданчиків, так і у звичайних житлових будинках та офісах акустичний комфорт впливає на продуктивність діяльності, якість сприйняття мовного сигналу та загальний рівень задоволення перебуванням у приміщенні.

На тлі цих викликів, дослідження, проведене Мельником Михайлом Романовичем, виглядає надзвичайно актуальним. Дисертація присвячена розробці нових моделей, методів та технічних засобів для вдосконалення акустичних властивостей закритих приміщень, з фокусом на автоматизацію проектувальних процесів в акустиці. Система запропонованих рішень не лише вирішує традиційні проблеми реверберації та звукопоглинання, але й інтегрується в загальний контекст сучасних технологій, таких як Інтернет речей (IoT), Ubiquitous Computing, і концепція «розумного будинку».

Таким чином, актуальність дисертації є незаперечною і відповідає сучасним вимогам як академічної, так і прикладної науки.

**Наукова новизна дисертаційної роботи** полягає в наступному:

**Вперше:**

- розроблено метод векторного імпульсно-частотного зондування закритих приміщень, який базується на формуванні наборів направлених

одночастотних імпульсів звукових коливань з використанням кореляційного та автокореляційного аналізу. Метод надає можливість детально досліджувати акустичні параметри, враховуючи просторову роздільну здатність і завадостійкість;

- запропоновано інформаційну модель автоматизованої системи добору звукоізоляційних матеріалів, яка інтегрує базу даних акустичних матеріалів із автоматичним класифікуванням і сортуванням відповідно до будівельних норм та типу приміщення. Це дає змогу масштабувати та адаптувати підходи до проектування акустичних середовищ;

- розроблено метод синтезу SPICE-моделей для комплексного представлення електро-акустичних параметрів, які поєднують імпедансні характеристики електричних компонентів та акустичних систем. Цей підхід надає можливість проводити параметричну оптимізацію компонентів систем акустометрії;

- створено модель конвертера даних для експорту геометричних моделей приміщень із системи SketchUp до CATT-Acoustic з автоматичним призначенням акустичних характеристик матеріалів. Це значно скорочує час акустичного проектування приміщень і узгоджує процеси між цифровими платформами.

#### **Удосконалено:**

- метод добору акустичних матеріалів, що надає можливість інверсно визначити товщину та питомий опір матеріалу для досягнення необхідного коефіцієнта звукопоглинання у заданому діапазоні частот;

- метод визначення опору потоку повітря на основі функції  $q(\Delta p)$  із використанням лінійної апроксимації, що дало змогу покращити точність і повторюваність результатів;

- метод добору коефіцієнтів звукопоглинання в CATT-Acoustic шляхом зворотного розрахунку через формулу Сабіна, що дозволило досягти точності моделювання часу реверберації до 0,5 с за одну ітерацію.

**Одержали подальший розвиток** метод структурно-функціонального синтезу вбудованих систем акустометрії із застосуванням кореляційного перетворення та квадратурного детектування, моделі сигнальних трактів систем акустометрії — синтезовано макромоделі швидкого перетворення Фур'є (FFT) для аналізу гармонік і спектрального розкладу сигналів, а також параметрів глибоких реверберацій у складних акустичних середовища.

**Значення одержаних результатів для науки і практики.** З допомогою розроблених методів та засобів:

- введено метод векторного імпульсно-частотного зондування та нових SPICE-моделей, що забезпечує підвищення точності й ефективності аналізу акустичних характеристик приміщень та надає можливість глибше зрозуміти взаємодію звукових хвиль із елементами середовища та отримати ефективні способи прогнозування результатів;

- розширено розуміння принципів електро-теплової аналогії для моделювання акустичних систем, що надає можливість вирішувати міждисциплінарні завдання моделювання сигналів у галузі електротехніки, акустики та теплових процесів;

- запропонована інтеграція моделей у концепції автоматизації проєктувальних робіт (CAD/CAM) відповідає принципам створення комплексних моделей, які враховують вимоги розумних систем (Smart Tech) та IoT;

- нові математичні моделі та алгоритми відкривають можливості для вдосконалення методів симуляції складних середовищ, таких як приміщення зі значним шумовим впливом чи нерівномірними акустичними характеристиками.

Практичну цінність роботи підтверджує впровадження розроблених систем автоматизованого добору акустичних матеріалів, що надало можливість суттєво скоротити час проєктування приміщень та забезпечити їх відповідність сучасним будівельним стандартам. Результати роботи успішно застосовані для

покращення акустики приміщень, зокрема у Національному академічному українському драматичному театрі ім. Марії Заньковецької та інших установах.

Одержані результати мають суттєве значення як для подальшого розвитку науки, так і для практичного застосування в різних сферах будівництва, ремонту, проектування та освіти. Вони формують основу для впровадження нових технологій та вдосконалення існуючих методів у сфері акустометрії.

**Рекомендації щодо використання результатів дисертації.** Результати дисертації Мельника Михайла Романовича можуть бути широко використані в проектуванні приміщень із високими акустичними вимогами — театральних і концертних залів, студій звукозапису, навчальних аудиторій та офісів відкритого типу. Розроблені моделі та методи, включаючи SPICE-макромоделі, алгоритми оптимізації сигналів і автоматизовану систему добору акустичних матеріалів, надають можливість підвищити ефективність проектування складних акустичних систем, зменшити час і витрати на розробку, а також забезпечити високу якість кінцевого акустичного середовища. Рекомендовано впровадження цих напрацювань у будівельній та архітектурній галузях, у компаніях, пов'язаних із проектуванням обладнання для акустичних систем, а також у освітніх і дослідницьких установах для підготовки спеціалістів у сфері акустометрії та автоматизації проектувальних робіт.

**Повнота викладення результатів в опублікованих працях.** Результати дисертаційної роботи представлено в 65 наукових публікаціях, зокрема в 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. Основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях. Рівень та кількість публікацій відповідають вимогам, що ставляться до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

**Оцінка дисертаційної роботи, її завершеність.** Дисертаційна робота є завершеною науковою працею. Дисертаційна робота складається зі вступу,

восьми розділів, узагальнених висновків, ґрунтовного списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 423 сторінки, з яких 347 займає основний зміст та містить 378 рисунків і 22 таблиці. У рефераті чітко наведені структура роботи, логіка викладення матеріалів та основні результати дослідження.

Робота написана чіткою, доступною мовою і відображає глибоке розуміння автором проблематики. Окремо слід відзначити вміння автора поєднувати теоретичні аспекти з практичною значущістю, а також його здатність ясно і структуровано представити ключові досягнення дисертаційного дослідження.

У **вступі** дисертаційної роботи Мельника Михайла Романовича обґрунтовано актуальність теми, яка полягає у розробці методів, моделей та засобів для дослідження й покращення акустичних властивостей закритих приміщень. Дослідження спрямоване на вирішення проблем забезпечення якісного звукового середовища в концертних залах, театрах, офісах та житлових будівлях. Автор акцентує увагу на важливості автоматизації процесу акустичного проєктування приміщень, інтеграції існуючих підходів із сучасними інформаційними технологіями, зокрема концепціями IoT (Індустріальний Інтернет речей). У вступі також підкреслено практичну значимість роботи для вдосконалення звукоізоляційних та звукопоглинальних матеріалів і створення нових стандартів акустичного комфорту приміщень.

У **першому розділі** виконано всебічний аналіз існуючих методів дослідження акустичного простору, включаючи класифікацію основних характеристик акустики приміщень. Автор виділив три групи характеристик: частотні (амплітудно-частотні та фазо-частотні характеристики), імпедансні (акустичний імпеданс із представленням у дійсній та реактивній складових) та динамічні (затухання, реверберація, розбірливість мовлення та музична чіткість). Особливу увагу приділено сучасним підходам до вимірювання акустичних параметрів у реальних умовах (in-situ), зокрема використанню MEMS-компонентів і P-U зондів звукової інтенсивності.

У **другому розділі** автор пропонує новітній метод векторного імпульсно-частотного зондування, виділяючи його специфіку та переваги. Особливу увагу приділено синтезу віртуальних сигналів для моделювання процесів реверберації й шуму в приміщеннях. Описано алгоритм формування зондуючих сигналів і оптимізацію тривалості імпульсів у складних акустичних умовах.

У **третьому розділі** представлено засади комплексного синтезу SPICE-макромоделей електро-акустичних перетворювачів, що слугують основою для автоматизованого проектування систем акустометрії. Розглянуто новий підхід до моделювання, який поєднує електричні, акустичні та теплові параметри в рамках єдиної макромоделі. Особливу увагу приділено моделюванню звукових випромінювачів, приймачів і сенсорів потоків газу. Для кожного з компонентів запропоновано поетапний синтез схем заміщення, зокрема розробку RC-ланцюгів для опису теплової релаксації та функціональних джерел, що реалізують електро-акустичний зв'язок.

У розділі детально описано метод електро-теплової аналогії, яка дозволяє заміщувати теплові та акустичні процеси еквівалентними електричними схемами. Представлено п'ять етапів створення макромоделей: перетворення фізичних параметрів MEMS-структур у електричні аналоги; синтез структур термічних сенсорів; моделювання динамічних характеристик компонентів; створення вихідних схем сенсорів; формування інтегрованих моделей для оптимізації. Усі представлені моделі базуються на новаторських підходах до проектування схемотехнічних систем, які враховують не тільки стандартизовані аспекти SPICE-моделювання, але й додаткові параметри шуму та завад.

У **четвертому розділі** розглянуто структурно-функціональні особливості перетворення та аналізу сигналів у системах акустометрії. Основну увагу приділено створенню SPICE-макромоделей сигнальних трактів, які забезпечують точність та завадостійкість вимірювальних процесів. У цьому розділі детально представлено модель симулятора віртуальних сигналів Data@Sim, що надає можливість проводити багатофакторний аналіз процесу

формування, передачі та обробки сигналів. Особливий акцент зроблено на вирішенні протиріч між просторовою роздільною здатністю та частотною селективністю при обробці акустичних коливань.

Наведено метод оптимізації процесу перетворення сигналів із використанням кореляційних та автокореляційних функцій. Запропоновано інноваційну методику векторної імпульсної акустометрії, яка реалізує інтегрування моночастотних сигналів та їх селекцію у шумових середовищах. Визначено шляхи удосконалення схем фільтрації та аналізу ехо-сигналів шляхом використання комплексних математичних та експериментальних моделей. Представлені результати підтверджують ефективність кореляційного детектування сигналів, яке забезпечує мінімізацію впливу завад та шуму на підсумкові характеристики акустичних систем.

У **п'ятому розділі** представлено реалізовані спеціалізовані засоби для експериментальних досліджень акустики приміщень. Автор детально описує використання апаратно-програмних комплексів, таких як безехові та ревербераційні камери, векторні випромінювачі, зонд звукопоглинання та інші пристрої, вдосконалені для точнішого аналізу акустичних параметрів. Розроблено методи калібрування та оцінювання впливу шумів і нелінійних спотворень, зокрема із застосуванням фільтрів типу Notch для активного шумопригнічення. Також описано вдосконалене програмне забезпечення для обробки звукових сигналів, включаючи еквайзер Equalizer APO. Експерименти проведено в різноманітних просторах, таких як театри, храми та навчальні аудиторії, що підтвердило ефективність розроблених підходів. Запропоновано та реалізовано вбудовану систему AMES (Acoustic Measurement Embedded System), яка використовує платформу PSoC та вдосконалений метод селективного підсилення заряду для поліпшення точності вимірювань навіть за умов високого рівня завад. Система відзначається підвищеною завадостійкістю та можливістю точного аналізу низькочастотних сигналів. Отримані результати, підтвержені верифікацією із класичними підходами, свідчать про

значне вдосконалення точності експериментальних вимірювань та скорочення часу їх проведення.

У **шостому розділі** розроблено та вдосконалено методи визначення акустичних характеристик пористих матеріалів, зокрема інверсний метод визначення опору повітряного потоку за моделлю Мікі. Запропоновано удосконалення лабораторної установки для вимірювання, що включає її комп'ютеризацію, використання точніших датчиків та впровадження автоматизації збору даних. Завдяки цьому значно підвищено точність і повторюваність вимірювань під час аналізу акустичних властивостей матеріалів. Розроблено методи лінійної апроксимації залежності між швидкістю повітряного потоку та перепадом тиску, що забезпечило більш точний розрахунок питомого опору повітряного потоку у діапазоні низьких швидкостей.

Результатом розділу є метод інверсного визначення коефіцієнтів звукопоглинання пористих матеріалів, який дає змогу за результатами моделювання або експериментів автоматично підбирати відповідні властивості матеріалу. Також розроблено алгоритми й моделі для синтезу акустичних матеріалів, що забезпечують їхнє проєктування із заданими властивостями у визначеному частотному діапазоні. Отримані результати, підтверджені експериментами, демонструють значний прогрес у підвищенні точності визначення акустичних параметрів і вдосконаленні методів добору характеристик матеріалів.

У **сьомому розділі** представлено розроблену інформаційну модель системи автоматизованого добору акустичних параметрів і матеріалів, яка інтегрується з базами даних та підтримує експорт у САД-системи. Розроблено структуру системи, що включає підсистему класифікації матеріалів, підсистему автоматизованого добору звукоізоляційних матеріалів, а також підсистему оцінювання акустичної якості приміщень за методом Беранека. Вдосконалено алгоритми класифікації матеріалів із використанням ієрархічного підходу, що



забезпечує автоматичне групування матеріалів за акустичними показниками відповідно до чинних стандартів.

Запропоновано програмну реалізацію автоматизованого добору матеріалів, яка включає динамічну фільтрацію та візуалізацію даних, що надає можливість значно скоротити час акустичного проєктування приміщень. Реалізовано автоматичний розрахунок звукоізоляційних параметрів і формування адаптивних звітів для архітекторів та інженерів. Крім того, розроблена модель інтегрується з методами оцінювання акустичних характеристик приміщень, такими як оцінка чіткості мови та часу реверберації, що суттєво підвищує точність та ефективність прийняття проєктних рішень.

У **восьмому розділі** продемонстровано практичне застосування розроблених методів та моделей акустометрії для реальних об'єктів. Зокрема, розроблено та реалізовано конвертер для автоматизованого експорту геометричних 3D-моделей із системи SketchUP у систему Catt-Acoustic, що значно скоротило час на побудову моделей складних приміщень. Вперше впроваджено метод автоматичного вибору акустичних характеристик матеріалів у моделі, що забезпечує точне визначення коефіцієнтів поглинання та розсіювання звукової енергії.

Вдосконалено процес калібрування акустичних моделей методом автоматизованого добору коефіцієнтів поглинання матеріалів через зворотне використання формули Сабіна, що дозволяє швидко коригувати тимчасові параметри реверберації приміщень. Проведено експериментальні дослідження часу реверберації у сакральних спорудах, театрах та лекційних аудиторіях, які підтвердили ефективність запропонованих методів. Крім того, вперше запропоновано концепцію адаптивної акустики шляхом інтеграції в моделі рухомих та обертових акустичних елементів для оптимізації характеристик приміщення залежно від його призначення.

**Відповідність дисертації паспорту спеціальності.** Дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.13.12 – системи автоматизації проєктувальних робіт, а саме за такими розділами:

- алгоритмізація завдань проектування, проблемна адаптація САПР;
- технологія реалізації САПР як складної організаційної, технічної та програмної системи на базі основних загальносистемних принципів включення, системної єдності, розвитку, комплексності, інформаційної єдності, сумісності, інваріантності;
- математичне моделювання й аналіз технічних об'єктів у САПР, зокрема методи ідентифікації об'єктів, декомпозиція та макромоделювання, чисельно-аналітичні методи аналізу об'єктів на мікро- та макрорівнях, моделювання логічних і функціональних схем дискретних пристроїв;
- пакети прикладних програм автоматизованого проектування;
- автоматизовані місця проєктувальників та інтерактивні графічні системи.

### **Зауваження щодо змісту дисертації.**

1. В роботі розглядаються переваги рішення тракту змішаного перетворення сигналів на основі підсилення заряду, зокрема можливість забезпечення високого рівня завадостійкості вимірювання інформативного сигналу у вигляді зміни електричного заряду в п'єзоелектричних перетворювачах. Однак, такий метод вимірювання є відомим, а висвітлені в дисертації результати не несуть наукової новизни.

2. Недостатньо розглянуто інтеграцію методів машинного навчання для аналізу великих обсягів акустичних даних, хоча це може значно підвищити автоматизацію процесів акустичного проєктування.

3. Нечітко сформульовано залежності між тепловими та акустичними параметрами. Хоча розробка SPICE-моделей представлена на високому рівні, але в описі взаємозв'язків між електричними, тепловими та акустичними характеристиками не вистачає деталізації.

4. Недостатньо проведено порівняльний аналіз ефективності запропонованих методів із наявними аналогами.

5. Для підтвердження універсальності та ефективності запропонованих алгоритмів не вистачає реальних тестових сценаріїв.

6. Певним недоліком ряду викладених в дисертаційній роботі результатів є їх недостатній аналіз. Так, наведені на рис. 5.40 - рис. 5.48 приклади результатів експериментальних досліджень автором фактично не аналізуються, тобто носять лише ілюстративних характер.

**Висновок.** Незважаючи на наведені зауваження, вони жодним чином не знижують цінність дисертаційної роботи та її наукових результатів, які вирізняються високою інноваційністю та прикладною значимістю. Дисертаційна робота Мельника М.Р. виступає як завершене наукове дослідження, що містить власні здобутки автора у вигляді нових наукових результатів. Ці результати спрямовані на вирішення важливої науково-практичної задачі – поліпшення акустичних властивостей замкнених приміщень, що реалізується шляхом розробки інноваційних методів, моделей та інструментів для дослідження й оптимізації їхніх акустичних параметрів. Автор запропонував сучасні підходи до аналізу акустичних характеристик матеріалів і автоматизації процесів акустичного проектування, що значно підвищує точність та ефективність роботи у цій галузі.

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертації, повністю відображені у статтях, опублікованих у фахових наукових виданнях, презентувалися на міжнародних конференціях і підтверджені актами впровадження. При цьому в дисертаційній роботі не використовувалися результати кандидатської дисертації Мельника М.Р.

Дисертація та реферат Мельника Михайла Романовича повністю відповідають вимогам паспорту спеціальності 05.13.12 — системи автоматизації проектувальних робіт (Перелік наукових спеціальностей, затверджений Наказом МОН від 14.09.2011 № 1057) та профілю спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05.

За актуальністю розв’язаної науково-прикладної проблеми, отриманими результатами та практичною значущістю дисертаційна робота Мельника М.Р.

«Моделі, методи та засоби дослідження та покращення акустичних властивостей закритих приміщень» відповідає всім вимогам, встановленим МОН України (наказ №40 від 12.01.2017, із змінами згідно з наказом №759 від 31.05.2019), а також пунктам 7 та 9 Постанови КМУ від 17.11.2021 № 1197, автор роботи – Мельник Михайло Романович – заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.13.12 — системи автоматизації проектувальних робіт.

**ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ:**

завідувач кафедри комп'ютерних наук

Запорізького національного університету,

доктор технічних наук, професор \_\_\_\_\_

Галина ШИЛО

Підпис д.т.н., проф. Шило Г.М. засвідчую

Вчений секретар

Вченої ради Запорізького

національного університету



\_\_\_\_\_ Оксана ПРОЦЕНКО