УДК 534.2:004.94
DOI https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-20

Сергій ПРИХОДЧЕНКО
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького 19, Дніпро, Україна, 49005
***ORCID:** 0000-0002-6562-0601*
***Scopus-Author ID:** 57201251400*

Лариса КОРЯШКІНА
доктор технічних наук, доцент, професор кафедри системного аналізу та управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького 19, Дніпро, Україна, 49005
***ORCID:** 0000-0001-6423-092X*
***Scopus-Author ID:** 55844269100*

Ольга ШЕВЦОВА
PhD, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005
***ORCID:** 0000-0002-0148-5877*
***Scopus Author ID:** 57220267804*

Євгеній ЗАГИНАЙЛО
аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005
***ORCID:** 0009-0004-5109-2053*

Бібліографічний опис статті: Приходченко, С., Коряшкіна, Л., Шевцова, О., Загинайло, Є. (2024). Концептуальна модель архітектури програмного забезпечення обробки багатоджерельних акустичних сигналів. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security,* 4, 169–177, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-20

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ АРХІТЕКТУРИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБРОБКИ БАГАТОДЖЕРЕЛЬНИХ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ

Робота присвячена розробці програмного забезпечення для моделювання поширення звукових хвиль у просторах з багатьма аудіо джерелами.

***Метою** є створення гнучкої та масштабованої програмної системи для моделювання акустичних хвиль, що поєднує чисельні методи, оптимізацію обчислень і сучасну візуалізацію, надаючи ефективний інструмент для аналізу складних акустичних процесів у різних середовищах.*

***Методологія.** Запропоновано архітектуру програмного забезпечення симуляції звукових хвиль, яка базується на модульному підході та використовує методи скінченних і граничних елементів для розв'язання рівнянь акустики, механізми підтримки паралельних обчислень, візуалізацію результатів симуляції.*

***Наукова новизна** полягає у розробці комплексного підходу щодо створення програмного забезпечення для симуляції звукових хвиль, використовуючи обчислювальні методи і алгоритми, які сумісно розв'язують рівняння акустики і рівняння, GPU-прискорення та багатопотокову обробку, що дозволяє досягти високої точності і ступені достовірності моделювання та оптимізації обчислювальних ресурсів.*

***Висновки.** В розробленій моделі програмного забезпечення передбачені модуль візуалізації, який забезпечує тривимірну інтерпретацію результатів, і модуль збереження даних, що слугує для обробки великих обсягів інформації. Запропонована модель дозволяє досліджувати звукові коливання, та моделювати звукові хвилі з декількох джерел, що робить її корисною для вирішення широкого спектра задач, зокрема проектування акустичних середовищ і аудіотехнологій.*

***Ключові слова:** комп'ютерна симуляція, акустичне моделювання, багатоджерельний звук, архітектура програмного забезпечення.*

Serhii PRYKHODCHENKO
PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, prykhodchenko.s.d@nmu.one
ORCID: *0000-0002-6562-0601*
Scopus-Author ID: *57201251400*

Larysa KORIASHKINA
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, koriashkina.l.s@nmu.one
ORCID: *0000-0001-6423-092X*
Scopus-Author ID: *55844269100*

Olha SHEVTSOVA
PhD, Associate Professor at the Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, shevtsova.o.s@nmu.one
ORCID: *0000-0002-0148-5877*
Scopus Author ID: *57220267804*

Yevhenii ZAHYNAILO
Postgraduate Student at the Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, 19, Dmytra Yavornytskoho Ave., Dnipro, Ukraine, 49005, Zahynailo.Yev.O@nmu.one
ORCID: *0009-0004-5109-2053*

To cite this article: Prykhodchenko, S., Koriashkina, L., Shevtsova, O., Zahynailo, Ye. (2024). Kontseptualna model arkhitektury prohramnoho zabezpechennia obrobky bahatodzherelnykh akustychnykh syhnaliv [Conceptual model of the software architecture for processing multisource acoustic signals]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security,* 4, 169–177, doi: https://doi.org/10.32782/IT/2024-4-20

CONCEPTUAL MODEL OF THE SOFTWARE ARCHITECTURE FOR PROCESSING MULTI-SOURCE ACOUSTIC SIGNALS

The paper is devoted to the development of software for modeling the propagation of sound waves in spaces with multiple audio sources.

The objective *is to create a flexible and scalable software system for acoustic wave modeling that combines numerical methods, computational optimization, and modern visualization, providing an efficient tool for analyzing complex acoustic processes in various environments.*

Methodology. *The proposed software architecture for sound wave simulation is based on a modular approach and employs finite element and boundary element methods to solve acoustic equations, mechanisms for supporting parallel computations, and simulation result visualization.*

Scientific Novelty. *The scientific novelty lies in developing a comprehensive approach to creating software for sound wave simulation using computational methods and algorithms that jointly solve acoustic equations and related equations, GPU acceleration, and multi-threaded processing. This allows achieving high accuracy and reliability in modeling and optimizing computational resources.*

Conclusions. *The developed software model includes a visualization module that ensures three-dimensional interpretation of results and a data storage module for processing large volumes of information. The proposed model enables the study of sound oscillations and the simulation of sound waves from multiple sources, making it useful for solving a wide range of tasks, including the design of acoustic environments and audio technologies.*

Key words: *Computer simulation, Acoustic modelling, Multi-source sound, Software architecture.*

Вступ. Комп'ютерна симуляція звукових хвиль є надзвичайно важливою галуззю, яка поєднує фізику, математику та інформатику для вирішення складних задач моделювання звуку. Дана робота присвячена проектуванню програмного забезпечення (ПЗ) для симуляції процесів поширення, відбивання, заломлювання та поглинанняя звукових хвиль у матеріалах з різними фізичними властивостями. Відомо, що розповсюдження звуку у рідкому та газоподібному середовищах характеризується наявністю конвективних та диссипативних ефектів. Тому особлива увага під час створення ПЗ приділена розробці обчислювальних методів і алгоритмів,

які розв'язують сумісно рівняння акустики і рівняння, що описують динаміку середовища. Ключовими аспектами є висока точність і ступінь достовірності моделювання та оптимізація обчислювальних ресурсів. Сучасні методи, такі як кінцеві елементи (FEM), методи граничних елементів (BEM) та дискретно-часові методи, дозволяють вирішувати проблеми в тривимірному просторі з високою деталізацією. Зокрема, розвиток GPU-прискорених обчислень значно покращив можливості симуляцій у реальному часі.

Обчислювальна симуляція звуку охоплює широкий спектр практичних застосувань. В акустиці приміщень симуляції використовують для проектування залів із ідеальною акустикою або шумовими бар'єрами. У медичній галузі на основі комп'ютерного моделювання вдосконалюються ультразвукові технології діагностики та терапевтичні методи. У сфері аудіотехнологій обчислювальна симуляція допомагає створювати реалістичні звукові ефекти у віртуальних середовищах, наприклад у відеоіграх чи кіно.

Метою роботи є створення гнучкої та масштабованої програмної системи для моделювання акустичних хвиль, що поєднує чисельні методи, оптимізацію обчислень і сучасну візуалізацію, надаючи ефективний інструмент для аналізу складних акустичних процесів у різних середовищах.

Об'єктом дослідження є архітектура програмного забезпечення для моделювання акустичних хвиль, зокрема методи оптимізації обчислювальних ресурсів, алгоритми чисельного аналізу та інтеграція інструментів візуалізації. Особлива увага приділяється розподіленим і паралельним обчисленням для складних задач.

Предметом дослідження є методи і алгоритми чисельного моделювання акустичних хвиль у багатоджерельних середовищах, програмна архітектура, що забезпечує оптимізацію обчислювальних процесів і ефективну обробку великих обсягів даних під час розв'язання фізичних рівнянь.

Постановка проблеми

Моделювання звукових хвиль на комп'ютері стикається з кількома суттєвими викликами, які потребують уваги дослідників та інженерів. По-перше, чисельна стабільність і точність. Звукові хвилі описуються складними математичними рівняннями, такими як рівняння хвиль, які можуть бути чутливими до вибору чисельних методів та параметрів моделювання. Неправильний вибір дискретизації або методу розв'язання може призвести до чисельної нестабільності, що в свою чергу вплине на точність результатів.

Відтак, потрібно розробити комплексний підхід щодо успішного моделювання звукових хвиль, включаючи вдосконалення чисельних методів, оптимізацію обчислювальних процесів і інтеграцію нових технологій для підвищення точності та ефективності симуляцій.

Літературний огляд

Математичні моделі та методи, що використовуються в системі обчислювальної симуляції звукових хвиль, ґрунтуються на фізичних законах поширення звуку в середовищі.

Основою є хвильове рівняння, яке описує просторово-часову динаміку звукових хвиль у середовищах із різними фізичними властивостями. У випадках, коли необхідно враховувати більше деталей, використовуються узагальнені рівняння, такі як рівняння Гельмгольца для гармонічних хвиль або рівняння Нав'є–Стокса.

Рівняння Гельмгольца може допомогти у вирішенні питань акустики, сейсмології, електромагнітної радіації (Juraev et al., 2024). Рівняння Гельмгольца є рівнозначним хвильовому рівнянню за умови незмінної частоти.

Поширення звукових хвиль в рідкому або газоподібному середовищі уже включене в рівняння Нав'є–Стокса, яке описує динаміку руху рідини або газу (Sacasa-Cespedes, 2024) і дозволяє визначити основні параметри течії.

Вибір чисельного методу інтегрування вказаних рівнянь залежить від вимог щодо точності та продуктивності. Приміром, розглянута в (Rosen, Godin & Raghuvanshi, 2020) модель хвильового акустичного поширення, використовує метод низькочастотних скінченних різниць у симуляції зі статичною сценою задля моделювання динамічного поширення акустичної хвилі у просторі. Такий метод заснований на дискретизації рівнянь у просторі та часі та має можливість покращення завдяки паралельним обчисленням.

У випадках складнішої геометрії чи в неоднорідних середовищах, як, наприклад, в комплексному підході до віброакустичного аналізу (Citarella et al., 2007), перевагу надають методу скінченних елементів (FEM). Цей метод дозволяє враховувати нерівномірний розподіл властивостей матеріалів задля аналізу структурної динаміки елементів, що в свою чергу дає можливість передбачити і проконтролювати потенційні проблеми в конструкції на етапі створення дизайну.

Метод граничних елементів (BEM) ефективний для задач, де потрібно моделювати звукові

хвилі в необмежених середовищах, або в задачах моделювання аероакустики, біоакустики або, навіть, звукової візуалізації в комп'ютерній анімації (Xun et al., 2008). Для прискорення обчислень застосовуються адаптивні методи сіток, які динамічно змінюють розподіл точок дискретизації залежно від локальної складності звукового поля. Це дозволяє зосередити ресурси в областях із високою інтенсивністю хвиль або складною взаємодією, наприклад, поблизу перешкод чи в зонах заломлення. До прикладу наведемо блоко-структурний адаптивний метод сіток. Ціллю даного методу є створення паралельного алгоритму адаптивних сіток, що слугує підвищенню обчислювальної ефективності та зберіганню в рамках задачі прогнозування шуму аеродвигуна. Натомість одним з висновків даного методу було те, що при збільшенні кількості процесорів обчислювальна продуктивність падала через необхідність балансування обчислювального навантаження всієї адаптивної сітки. А, отже, покращення існуючих методів шляхом паралельних обчислень мають бути протестовані на різних конфігураціях системи задля агрументації оцінки ефективності.

Розглядаючи інноваційні підходи до локалізації кількох джерел звуку у двовимірному просторі, робота (Le Moing et al., 2020) використовує глибокі нейронні мережі. Автори пропонують вдосконалену архітектуру «енкодер-декодер», яка включає роздільну обробку даних з різних масивів мікрофонів і використання пар мікрофонів для покращення характеристик моделі. Впроваджено два нових методи представлення результатів: теплові карти і вдосконалену сіткову модель, що забезпечують вищу точність локалізації навіть за наявності обмежених навчальних даних. Результати експериментів, проведених на синтетичних і реальних даних, демонструють перевагу цього підходу порівняно з існуючими методами, хоча адаптація до реального світу все ще вимагає більшого обсягу навчальних даних.

Методика Competitive K-means Clustering (Lee & Choi, 2010) використовується для локалізації звуків з декількох джерел, забезпечуючи поділ акустичних сигналів у складних звукових сценах. Алгоритм ефективно групує звукові дані, покращуючи точність визначення місця розташування звукових джерел завдяки конкурентному підходу. Експерименти показують високу стійкість моделі навіть в умовах шумових перешкод. Це робить підхід придатним для застосування в робототехніці, аудіосистемах та інших завданнях із багатозадачною обробкою звуку.

Метод локалізації джерела звуку за статистичним зрівнюванням джерел (Gao et al., 2019) використовує статистичну врівноваженість компонентів джерел для локалізації звуку в багатокомпонентних акустичних середовищах. Підхід ґрунтується на поділі сигналів з використанням статистичних характеристик, таких як енергія і кореляція, щоб поліпшити точність локалізації. Модель показує високу ефективність у складних звукових сценах, особливо за наявності звуків, що перекриваються. Це робить метод перспективним для систем аудіомоніторингу та робототехніки в шумних середовищах.

Метод локалізації багатоджерельного звукозапису (Jia, 2018) ґрунтується на покроковому видаленні компонентів домінуючого джерела для аналізу залишкових сигналів. Цей підхід дає змогу поетапно виділяти менш виражені джерела звуку, забезпечуючи більш точне їх визначення в зашумлених і багатокомпонентних середовищах. Використовуючи статистичний аналіз домінуючих компонентів, модель ефективно зменшує взаємні перешкоди між джерелами. Цей підхід перспективний для аудіомоніторингу, систем розпізнавання та роботизованих додатків. Одним з прикладів такого програмного забезпечення є застосунок, що використовувався в роботі (Wang, 2006).

Матеріали та методи. Архітектурна модель програмного забезпечення для системи обчислювальної симуляції звукових хвиль побудована за принципами багаторівневої модульної організації, що забезпечує високу гнучкість, ефективність та простоту в обслуговуванні. UML-діаграма компонентів розробленої системи комп'ютерного моделювання звукових хвиль представлена на рис. 1. У центрі системи знаходиться обчислювальний модуль, який відповідає за чисельне моделювання фізичних процесів, пов'язаних із поширенням звукових хвиль. Цей компонент реалізує алгоритми, такі як метод скінченних або граничних елементів, і включає механізми для дискретизації геометрії середовища, моделювання часової динаміки та врахування крайових умов.

Для взаємодії з користувачами передбачено модуль управління параметрами симуляції, який дозволяє налаштовувати фізичні властивості середовища, задавати початкові умови та конфігурувати джерела звуку. Інтерфейс цього модуля підтримує як текстові конфігураційні файли, так і інтеграцію з графічними інтерфейсами, якщо такі є частиною системи.

Значна увага приділена модулю зберігання даних, який оптимізований для роботи з великими обсягами інформації, що утворюються під

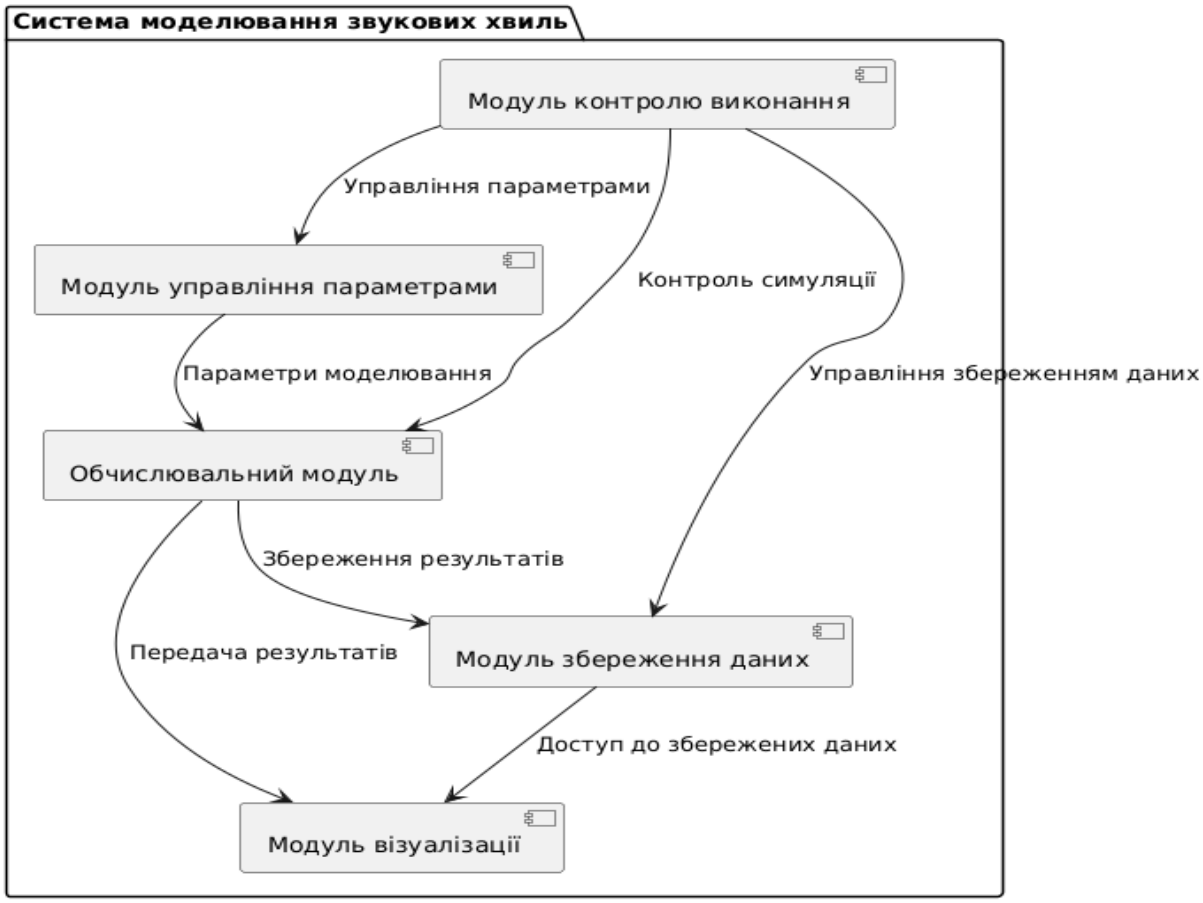

Рис. 1. UML-діаграма компонентів

час моделювання. Цей модуль забезпечує ефективне збереження результатів у форматах, придатних для багатопотокового доступу, таких як HDF5 або NetCDF, і надає засоби для фільтрації та попередньої обробки даних, які згодом можуть бути використані для аналізу чи візуалізації.

Візуалізація результатів симуляції реалізована через модуль, що дозволяє створювати статичні зображення, анімації та інтерактивні тривимірні сцени. Основою для цього є графічні бібліотеки, наприклад, VTK або OpenGL, які забезпечують масштабованість залежно від обсягу оброблюваних даних і необхідного рівня деталізації.

Система також включає механізми оптимізації продуктивності через підтримку паралельних обчислень, що реалізуються за допомогою багатопотокової обробки CPU або GPU-прискорення. Ця функціональність інтегрована в обчислювальний модуль, що дозволяє адаптуватися до різних обчислювальних середовищ – від суперкомп'ютерів до стандартних робочих станцій.

UML Sequence diagram розробленої системи обчислювальної симуляції звуку представлена на рис. 2.

На верхньому рівні архітектури знаходиться модуль контролю виконання, який координує роботу всіх компонентів, розподіляє ресурси і забезпечує обробку виняткових ситуацій. Він відповідає за стабільність системи, перевірку введених даних на коректність і ведення журналів подій для діагностики. Завдяки модульній структурі ця система легко розширюється і адаптується до нових задач без значних змін у базовій архітектурі, що робить її зручною для розробників і дослідників.

Обчислювальний модуль для моделювання поширення звукових хвиль організований як система класів, кожен з яких відповідає за певний аспект симуляції. Центральним елементом є клас Solver, який реалізує основні чисельні методи, такі як метод скінченних елементів, скінченних різниць або граничних елементів. Він забезпечує дискретизацію рівнянь, розрахунок часових кроків і контроль стабільності обчислень.

Геометрія моделюваного середовища представлена через клас Mesh, що зберігає інформацію про вузли, елементи та їхні зв'язки. Цей підхід дозволяє працювати з нерівномірними чи адаптивними сітками. Фізичні

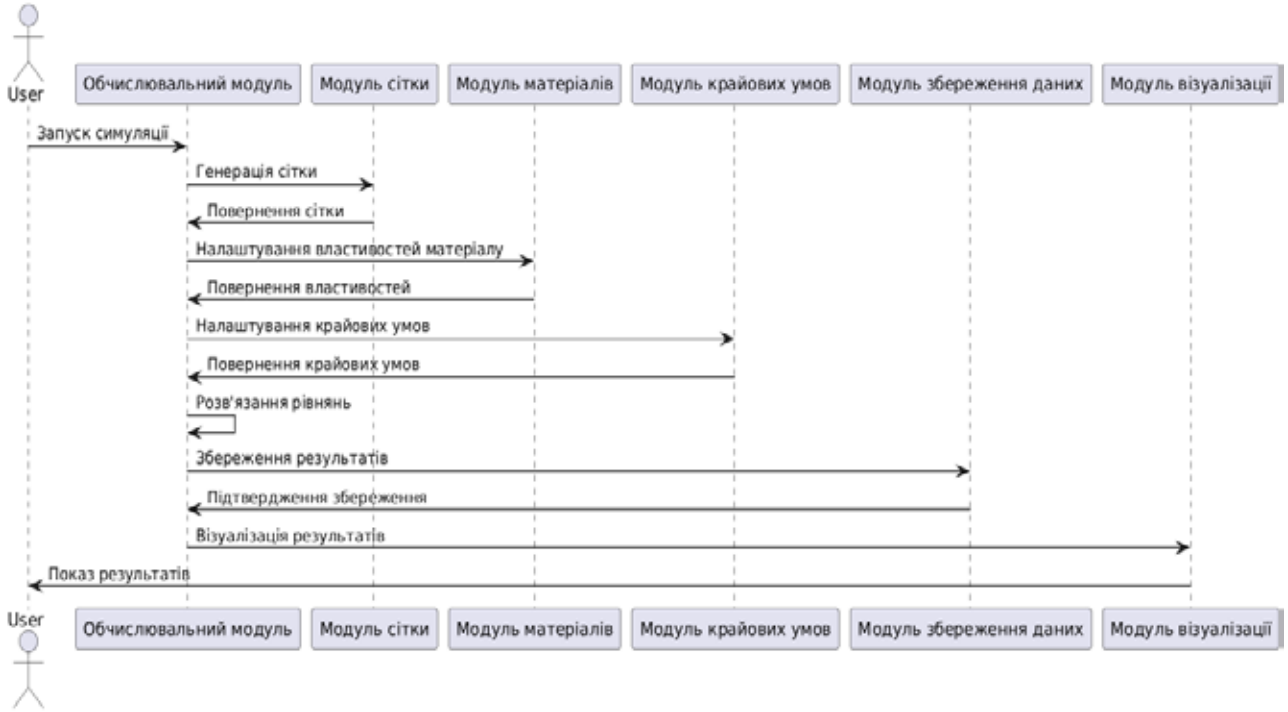

Рис. 2. UML Sequence diagram

характеристики матеріалів, зокрема густина, швидкість звуку та коефіцієнти поглинання, управляються класом MaterialProperties, який забезпечує доступ до цих даних для інших компонентів системи.

Крайові умови моделі визначаються класом BoundaryConditions, який інтегрується з Solver для встановлення фіксованих значень, відбиття чи поглинання хвиль на межах середовища. Для підвищення продуктивності система використовує клас ParallelComputingManager, що забезпечує паралельні обчислення через багатопоточну обробку або GPU-прискорення. Цей клас розподіляє задачі між обчислювальними ресурсами й оптимізує обмін даними між процесами.

Результати симуляції структуруються класом SimulationData, який забезпечує зручний доступ до вихідних даних, їхнє збереження і візуалізацію. Крім того, цей клас підтримує інтерфейси для проміжного аналізу, що дозволяє здійснювати моніторинг процесу обчислень.

Для перевірки коректності моделі використовується клас ValidationTools, який тестує результати на основі контрольних задач і забезпечує їх порівняння з аналітичними чи експериментальними даними. Цей підхід дозволяє гарантувати точність і надійність чисельних розв'язків у системі.

Програмне забезпечення для обчислювальної симуляції звукових хвиль є складною багаторівневою системою, структура якої базується на принципах модульності, масштабованості та чіткого розподілу відповідальності між компонентами. Компонентна структура цього програмного забезпечення складається з взаємопов'язаних модулів, кожен із яких має чітко визначену роль у загальному процесі моделювання. Ключовою метою такої архітектури є забезпечення ефективності, гнучкості та надійності системи.

Центральне місце займає обчислювальний модуль, який реалізує чисельне розв'язання рівнянь, що описують поширення звукових хвиль. Цей модуль є ядром системи, яке безпосередньо виконує складні математичні операції з урахуванням заданих фізичних параметрів. Він складається з кількох підкомпонентів, серед яких розрахунковий блок для обчислення значень на кожному етапі симуляції, блок інтеграції часових і просторових параметрів, а також механізми оптимізації для ефективного використання апаратних ресурсів.

Модуль управління параметрами забезпечує інтерфейс для взаємодії з обчислювальним ядром, приймаючи від користувача початкові дані та передаючи їх у форматі, який адаптований для чисельних методів. Він виконує перевірку вхідних параметрів, їхню нормалізацію та, за необхідності, автоматичну оптимізацію. Цей модуль також включає підсистему для збереження наборів параметрів, що дозволяє

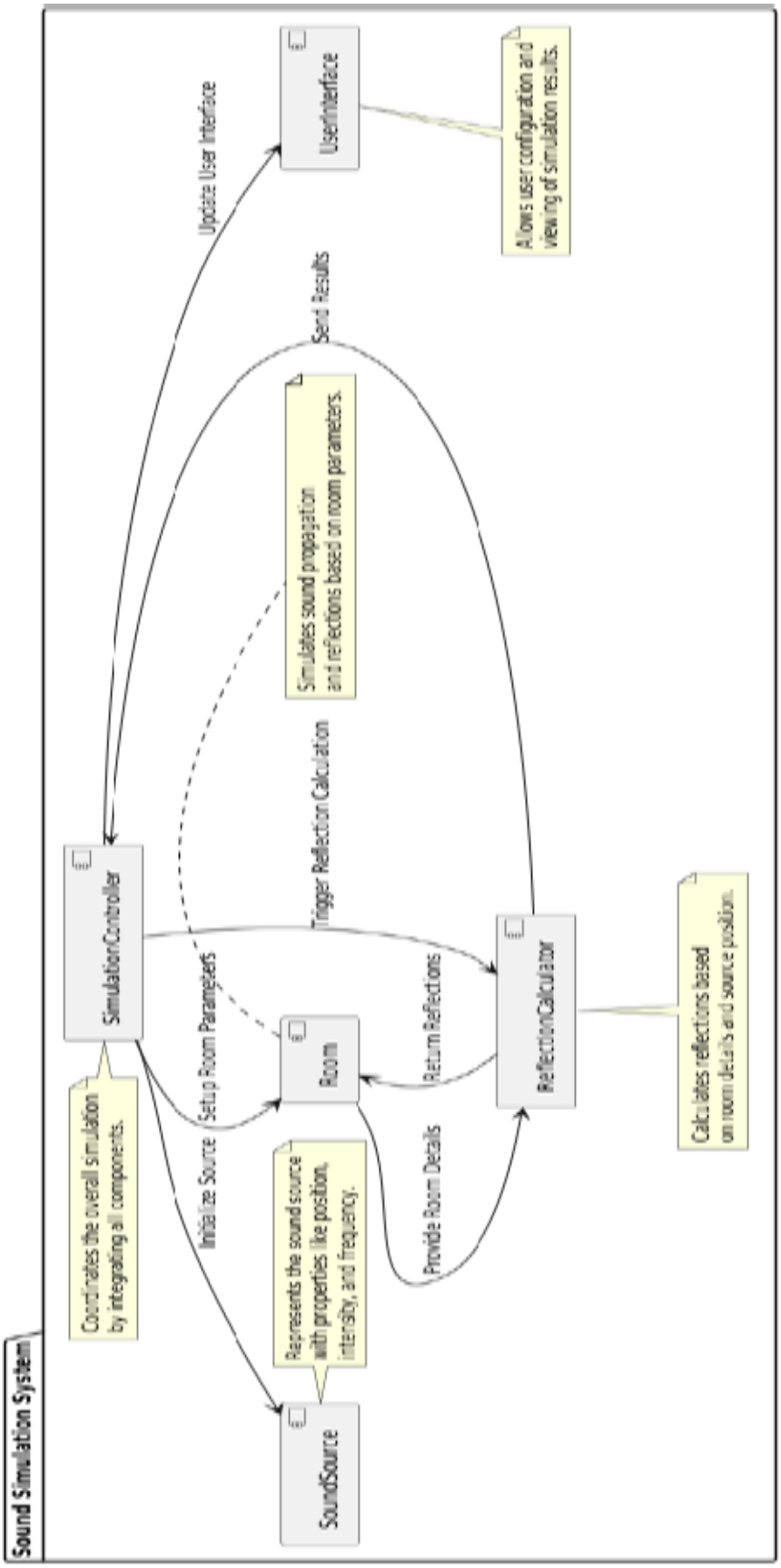

Рис. 3. Діаграма компонентів UML для розробленого інформаційної системи

повторно використовувати типові конфігурації для швидкого запуску симуляцій.

Модуль візуалізації призначений для представлення результатів обчислень у зручній для користувача формі. Цей компонент приймає дані, отримані від обчислювального модуля, і трансформує їх у графічні чи текстові формати. Він підтримує різні типи візуалізації, такі як двовимірні графіки, тривимірні моделі та анімації. Особлива увага приділяється інтерактивності, що дозволяє користувачеві змінювати параметри відображення в реальному часі для детальнішого аналізу результатів.

Модуль збереження даних забезпечує довготривале зберігання результатів симуляції, параметрів, а також журналів виконання завдань. Він базується на реляційній базі даних, де інформація організована у вигляді взаємопов'язаних таблиць. Цей модуль також відповідає за обробку запитів на доступ до даних, забезпечуючи ефективний пошук і експорт результатів у потрібному форматі. Окрім того, він інтегрується з механізмами резервного копіювання для захисту від втрати даних.

Модуль контролю виконання відіграє роль координатора роботи системи. Він управляє чергою завдань, забезпечуючи послідовність їх виконання відповідно до заданих пріоритетів. Цей модуль реалізує механізми моніторингу стану системи в реальному часі, що дозволяє виявляти та виправляти можливі збої. Окрім цього, він відповідає за логування процесів, що є критично важливим для відтворення сценаріїв у разі виникнення помилок.

Система має інтеграційний шар, який забезпечує взаємодію між її компонентами. Комунікація між модулями реалізована за допомогою внутрішнього API, що дозволяє досягти високої швидкості обміну даними та мінімізувати ризики конфліктів. Інтеграційний шар також відповідає за управління потоками даних між модулями, забезпечуючи їхню синхронізацію та узгодженість. Загалом, така компонентна структура дозволяє гнучко адаптувати програмне забезпечення до потреб різних користувачів, розширювати функціональність шляхом додавання нових модулів і гарантувати стабільну роботу навіть за умов значного навантаження.

Схема модулів розробленої програми представлена на рис. 3.

Програмне забезпечення, створене для симуляції звукових хвиль, є результатом комплексного поєднання математичного моделювання, архітектурного планування та передових програмних технологій. Цей інструмент розроблено для точного розрахунку, відображення та аналізу процесів поширення звуку в замкнених або відкритих середовищах. Робота програмного забезпечення базується на тісній інтеграції кількох ключових модулів, кожен з яких виконує конкретну роль, забезпечуючи надійну та послідовну роботу всієї системи.

Висновки. Представлена концептуальна модель програмного забезпечення для обчислювальної симуляції звукових хвиль. Створене програмне забезпечення є високотехнологічною системою, що поєднує точні математичні моделі, ефективні алгоритми та сучасні методи візуалізації. Воно надає дослідникам і інженерам інструмент для аналізу та оптимізації акустичних середовищ, дозволяючи моделювати ситуації, які складно або неможливо відтворити у реальних умовах. Завдяки модульному підходу система є гнучкою, масштабованою та придатною для використання у широкому спектрі прикладних задач, від архітектурного акустичного проєктування до досліджень в області фізики звуку.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Juraev D., Agarwal P., Elsayed E., Nauryz T. Helmholtz equations and their applications in solving physical problems. 2024. 4. 54–64.

2. Sacasa-Cespedes S. A Geometric Approach to the Navier-Stokes Equations. 2024. 10.48550/arXiv.2411.18724.

3. Rosen M., Godin K. W., Raghuvanshi N. Interactive sound propagation for dynamic scenes using 2D wave simulation. *Computer Graphics Forum*, 2020. 39, 39–46. https://doi.org/10.1111/cgf.14099.

4. Citarella R., Federico L., Cicatiello A. Modal acoustic transfer vector approach in a FEM–BEM vibro-acoustic analysis, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Volume 31, Issue 3, 2007. Pages 248–258, ISSN 0955-7997, https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2006.09.004.

5. Yijun L. On the BEM for acoustic wave problems, *Engineering Analysis with Boundary Elements,* 2019. Volume 107, Pages 53–62, ISSN 0955-7997, https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.07.002.

6. Xun H., Xin Z., Simon K. R. Adaptive mesh refinement computation of acoustic radiation from an engine intake, *Aerospace Science and Technology*, 2008. Vol. 12, Issue 5, 418–426, ISSN 1270-9638, https://doi.org/10.1016/j.ast.2007.09.004.

7. Le Moing G., Vinayavekhin P., Inoue T., Vongkulbhisal J., Munawar A., Tachibana R. Agravante D. Learning Multiple Sound Source 2D Localization. 2020. 10.48550/arXiv.2012.05515.

8. Lee B. Choi J. Multi-source sound localization using the competitive k-means clustering. 2010. 1–7. 10.1109/ETFA.2010.5641169.

9. Gao Sh. Jia M., Wu Yu. Jia Yi., Mingchen W. Multiple Sound Sources Localization by using Statistical Source Component Equalization. 2019. 320–325. 10.1145/3373509.3373582.

10. Jia M. Wu Yu., Bao Ch., Wang, J. Multiple Sound Sources Localization with Frame-by-Frame Component Removal of Statistically Dominant Source. *Sensors.* 2018. 18. 3613. 10.3390/s18113613.

11. Wang M., Freund J. B., Lele, S. K. COMPUTATIONAL PREDICTION OF FLOW-GENERATED SOUND. *Annual Review of Fluid Mechanics,* 2006. 38, 483–512.

REFERENCES:

1. Juraev, D., Agarwal, P., Elsayed, E. & Nauryz, T. (2024). Helmholtz equations and their applications in solving physical problems. 4. 54–64.

2. Sacasa-Cespedes, S. (2024). A Geometric Approach to the Navier-Stokes Equations. 10.48550/arXiv.2411.18724.

3. Rosen, M., Godin, K. W. & Raghuvanshi, N. (2020). Interactive sound propagation for dynamic scenes using 2D wave simulation. Computer Graphics Forum, 39: 39-46. https://doi.org/10.1111/cgf.14099.

4. Citarella, R., Federico, L. & Cicatiello, A. (2007). Modal acoustic transfer vector approach in a FEM–BEM vibro-acoustic analysis, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Volume 31, Issue 3, Pages 248–258, ISSN 0955-7997, https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2006.09.004.

5. Yijun, L. (2019). On the BEM for acoustic wave problems, Engineering *Analysis with Boundary Elements*, Volume 107, Pages 53–62, ISSN 0955-7997, https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.07.002.

6. Xun, H., Xin, Z. & Simon K. R. (2008). Adaptive mesh refinement computation of acoustic radiation from an engine intake, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 12, Issue 5, 418-426, ISSN 1270-9638, https://doi.org/10.1016/j.ast.2007.09.004.

7. Le Moing, G., Vinayavekhin, P., Inoue, T., Vongkulbhisal, J., Munawar, A., Tachibana, R. & Agravante, D. (2020). Learning Multiple Sound Source 2D Localization. 10.48550/arXiv.2012.05515.

8. Lee, B. & Choi, J. (2010). Multi-source sound localization using the competitive k-means clustering. 1–7. 10.1109/ETFA.2010.5641169.

9. Gao, Sh. Jia, M., Wu, Yu. Jia, Yi. & Mingchen, W. (2019). Multiple Sound Sources Localization by using Statistical Source Component Equalization. 320–325. 10.1145/3373509.3373582.

10. Jia, M. Wu, Yu., Bao, Ch. & Wang, J. (2018). Multiple Sound Sources Localization with Frame-by-Frame Component Removal of Statistically Dominant Source. Sensors. 18. 3613. 10.3390/s18113613.

11. Wang, M., Freund, J. B., & Lele, S. K. (2006). COMPUTATIONAL PREDICTION OF FLOW-GENERATED SOUND. Annual Review of Fluid Mechanics, 38, 483–512.