

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря 4.Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГЕЙКО ОЛЕГ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 004.94:534.2

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ВАЛІДАЦІЇ МАТЕМАТИЧНИХ
МОДЕЛЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ ДЛЯ
ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ КОМПЛЕКСІВ**

121 – Інженерія програмного забезпечення

12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

_____ Олег ГЕЙКО

Науковий керівник: Варава Іван Андрійович, кандидат технічних наук

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Гейко О. О. Методи та програмні засоби валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль для програмно-апаратних комплексів. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення». – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2026.

Дисертацію присвячено розробленню методів і програмних засобів валідації дискретних математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль на основі порівняння результатів чисельного моделювання з даними натурних вимірювань за умов обмежених обчислювальних ресурсів. Основна увага зосереджена не лише на математичному описі акустичних процесів, а й на створенні програмно реалізованих процедур підготовки даних, оцінювання точності, автоматизованого вибору параметрів моделі та формування придатних до практичного використання конфігурацій чисельної постановки.

Актуальність теми зумовлена тим, що сучасні програмно-апаратні комплекси гідроакустичного призначення дедалі ширше використовують результати чисельного моделювання для аналізу акустичних полів, оцінювання параметрів середовища, підтримки експериментальних досліджень і прийняття інженерних рішень. У таких комплексах математична модель є не ізольованим теоретичним об'єктом, а частиною програмної системи, результати роботи якої мають бути достатньо достовірними для практичного застосування. Тому важливим є не лише побудувати математичну модель розповсюдження акустичних хвиль, а й забезпечити її коректну валідацію за даними натурних вимірювань.

У практичних задачах гідроакустики валідація математичних моделей ускладнюється низкою факторів. По-перше, результати чисельного моделювання та експериментальні дані часто мають різні частоти дискретизації. Модельний сигнал формується відповідно до параметрів чисельної схеми, просторового кроку,

часового кроку та умов стійкості, тоді як натурні вимірювання реєструються апаратурою з власною фіксованою частотою дискретизації. Унаслідок цього пряме порівняння часових рядів є математично некоректним і може призводити до помилкових висновків щодо якості моделі.

По-друге, натурні гідроакустичні сигнали містять шумові складові, апаратні спотворення, фазові зміщення, локальні флуктуації амплітуди та інші фактори, які ускладнюють зіставлення з результатами чисельного моделювання. Тому оцінювання точності потребує не простого порівняння «сирих» сигналів, а попередньої підготовки даних, фільтрації, ресемплінгу, спектрального виділення корисної складової та використання статистичних метрик на узгоджених рядах даних.

По-третє, практичне застосування чисельних моделей у складі програмно-апаратних комплексів обмежується доступним часом виконання, обсягом оперативної пам'яті та необхідністю виконання серійних прогонів. Підвищення точності моделі за рахунок зменшення кроку сітки, збільшення кількості вузлів на довжину хвилі або використання більш консервативних параметрів поглинальних шарів зазвичай призводить до суттєвого зростання обчислювальних витрат. Тому в практичних умовах важливо не тільки знайти конфігурацію з мінімальною похибкою, а й визначити таку область параметрів моделі, яка забезпечує прийнятну точність за допустимих витрат часу та пам'яті.

З аналізу зазначених обмежень випливає висновок, що актуальною є науково-прикладна задача розроблення методів і програмних засобів валідації дискретних математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль, які забезпечують коректне узгодження модельних і натурних сигналів, кількісне оцінювання їх узгодженості та автоматизований вибір параметричних конфігурацій, придатних до використання у реальних програмно-апаратних комплексах за умов обмежених обчислювальних ресурсів.

Наукове завдання дисертаційної роботи полягає у розробленні методів і програмних засобів валідації дискретних математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль, які на основі узгодження результатів чисельного моделювання з даними натурних вимірювань забезпечують підвищення достовірності оцінювання

точності моделі та формування області допустимих параметрів чисельної постановки за критеріями чисельної коректності, ресурсної здійсненності й достатньої точності.

Метою дисертації є підвищення практичної придатності програмно-апаратних комплексів гідроакустичного призначення шляхом розроблення методів і програмних засобів валідації дискретних моделей розповсюдження акустичних хвиль, які забезпечують коректне порівняння змодельованих і натурних сигналів та автоматизований вибір ресурсно-ефективних параметрів чисельної моделі за заданим рівнем точності.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі завдання:

1. Проаналізовано сучасні підходи до валідації чисельних моделей гідроакустичних полів, методи цифрової обробки сигналів та способи оцінювання узгодженості результатів моделювання з натурними вимірюваннями.

2. Визначено основні обмеження існуючих підходів до прямого порівняння модельних і експериментальних часових рядів, зокрема розбіжність частот дискретизації, різну структуру шумів, фазові зміщення та залежність результатів порівняння від попередньої обробки сигналів.

3. Розроблено метод підготовки й узгодження модельних і натурних сигналів, який включає вибір параметрів узгодження, ресемплінг часових рядів, антиаліасингову фільтрацію, нормування та формування зіставних вибірок.

4. Розроблено процедуру спектральної оцінки модельних і експериментальних сигналів із виділенням інформативної складової на частоті випромінювача та формуванням амплітудних характеристик, придатних для подальшого статистичного порівняння.

5. Обґрунтовано використання статистичних метрик оцінювання узгодженості результатів чисельного моделювання з експериментальними даними, зокрема нормованих показників похибки, які дозволяють кількісно оцінити ступінь придатності моделі для заданого сценарію застосування.

6. Розроблено метод визначення параметрів і області їх допустимих значень для дискретної математичної моделі розповсюдження акустичних хвиль на основі

послідовного відбору конфігурацій за критеріями чисельної коректності, ресурсної здійсненності та порогової точності.

7. Проведено експериментальну перевірку запропонованих методів на натурних гідроакустичних даних із використанням відкритого набору SWellEx-96 та оцінено досягнутий компроміс між точністю й обчислювальними витратами.

8. Реалізовано програмні засоби, що забезпечують автоматизацію етапів підготовки даних, спектрально-статистичної оцінки, порівняння модельних і натурних сигналів та формування області допустимих параметрів чисельної моделі.

Об'єктом дослідження є процес розробки програмного забезпечення валідації дискретних математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль.

Предметом дослідження є методи та програмні засоби валідації дискретних математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль на основі порівняння результатів моделювання з даними натурних вимірювань за умов обмежених обчислювальних ресурсів.

У роботі удосконалено метод валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль, який базується на порівнянні результатів чисельного моделювання з даними натурних вимірювань за стандартними метриками точності. На відміну від існуючих підходів, запропонований метод передбачає автоматизоване узгодження частот дискретизації модельних і експериментальних сигналів, попередню фільтрацію, ресемплінг, спектральне виділення корисної складової та статистичне оцінювання точності на узгоджених рядах даних. Це дозволяє виконувати коректне порівняння результатів моделювання з натурними вимірюваннями у випадках, коли пряме зіставлення часових рядів є математично некоректним.

Уперше розроблено метод визначення параметрів і області їх допустимих значень для дискретної математичної моделі розповсюдження акустичних хвиль, який забезпечує необхідну точність за визначеними метриками за умови досягнення чисельної коректності та ресурсної здійсненності. Метод ґрунтується на послідовному відборі конфігурацій параметрів за каскадом критеріїв. Спочатку виключаються конфігурації, що не відповідають умовам чисельної коректності.

Далі відсіюються варіанти, які перевищують допустимі ресурсні обмеження за часом виконання або обсягом пам'яті. Після цього залишаються лише ті конфігурації, які забезпечують достатній рівень точності за заданою метрикою порівняння з експериментальними даними. За потреби метод може доповнюватися перевіркою самоузгодженості відносно більш точної контрольної конфігурації.

Також уперше розроблено модульну архітектуру програмного забезпечення валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль, яка реалізує запропоновані методи та забезпечує підключення реалізацій чисельних моделей, завантаження й підготовку натурних даних, узгодження сигналів, спектрально-статистичну оцінку точності, обчислення метрик похибки та автоматизоване визначення області допустимих параметрів моделі. Така архітектура забезпечує можливість інтеграції розробленого програмного засобу до складу програмно-апаратних комплексів гідроакустичного призначення.

Експериментальну перевірку запропонованих рішень виконано на тестових і натурних даних. Для практичної апробації методу визначення параметрів моделі використано відкритий датасет SWellEx-96 та засоби чисельного моделювання акустичних хвиль. У процесі експериментів реалізовано процедури узгодження сигналів моделі та вимірювання, приведення даних до спільної частоти дискретизації, оцінювання часової затримки у вузькій смузі навколо частоти випромінювача, масштабування сигналів за амплітудою та фазою, а також підсумкове порівняння за нормованою метрикою похибки NMAE.

Результати експериментів підтвердили практичну здійсненність автоматизованого вибору ресурсно-ефективної конфігурації за збереження прийнятної точності. Для розглянутого експериментального фрагмента було досягнуто скорочення часу моделювання приблизно у 2,96 раза без перевищення встановленого порогу похибки $NMAE \leq 0,2$. Це відповідає зменшенню часу виконання приблизно на 66,2 % порівняно з базовою конфігурацією. Отримані результати свідчать, що запропонований підхід дозволяє не лише оцінювати точність моделі, а й практично обирати такі параметри чисельної постановки, які забезпечують прийнятний баланс між точністю й обчислювальними витратами.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні програмного засобу та алгоритмічних процедур, які забезпечують відтворювану валідацію математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль у складі програмно-апаратних комплексів. Розроблені рішення дозволяють автоматизувати порівняння результатів чисельного моделювання з натурними вимірюваннями, зменшити залежність оцінювання від ручного підбору параметрів, підвищити обґрунтованість вибору конфігурацій чисельної моделі та скоротити час моделювання при збереженні заданого рівня точності.

Запропоновані методи та програмні засоби можуть бути використані під час розроблення, модернізації та тестування спеціалізованих гідроакустичних програмно-апаратних комплексів, у задачах експериментальної перевірки чисельних моделей, у системах підтримки серійних прогонів, а також у науково-дослідній і навчальній діяльності при підготовці фахівців у галузі інженерії програмного забезпечення, математичного моделювання та цифрової обробки сигналів.

Ключові слова: інженерія програмного забезпечення, архітектура програмного забезпечення, валідація та верифікація математичних моделей, акустичні хвилі, обробка цифрових сигналів, моделювання гідроакустичних сигналів, спектральний аналіз, алгоритмічна обробка даних, параметри моделі, чисельна коректність, оптимізація обчислювальних ресурсів, програмно-апаратний комплекс, статистичні метрики.

SUMMARY

Heiko O. O. Methods and Software Tools for Validation of Mathematical Models of Acoustic Wave Propagation for Software and Hardware Complexes Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 121 Software Engineering. The dissertation was prepared at the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. The defense of the dissertation is held at the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the development of methods and software tools for validating discrete mathematical models of acoustic wave propagation based on the comparison of numerical simulation results with field measurement data under limited computational resources. The main focus is placed not only on the mathematical description of acoustic processes, but also on the development of software-implemented procedures for data preparation, accuracy assessment, automated selection of model parameters, and formation of numerical model configurations suitable for practical use.

The relevance of the topic is determined by the fact that modern software and hardware complexes for hydroacoustic applications increasingly use numerical simulation results for acoustic field analysis, estimation of environmental parameters, support of experimental studies, and engineering decision-making. In such complexes, a mathematical model is not an isolated theoretical object, but a component of a software system whose results must be sufficiently reliable for practical application. Therefore, it is important not only to construct a mathematical model of acoustic wave propagation, but also to ensure its correct validation using field measurement data.

In practical hydroacoustic problems, validation of mathematical models is complicated by several factors. First, numerical simulation results and experimental data often have different sampling rates. The simulated signal is formed according to the parameters of the numerical scheme, spatial step, time step, and stability conditions,

whereas field measurements are recorded by hardware with its own fixed sampling rate. As a result, direct comparison of time series is mathematically incorrect and may lead to erroneous conclusions regarding model quality.

Second, field hydroacoustic signals contain noise components, instrumental distortions, phase shifts, local amplitude fluctuations, and other factors that complicate their comparison with numerical simulation results. Therefore, accuracy assessment requires not a simple comparison of “raw” signals, but preliminary data preparation, filtering, resampling, spectral extraction of the informative component, and the use of statistical metrics on harmonized data series.

Third, the practical use of numerical models within software and hardware complexes is limited by available execution time, RAM capacity, and the need to perform series of simulation runs. Improving model accuracy by reducing the grid step, increasing the number of points per wavelength, or using more conservative absorbing layer parameters usually leads to a significant increase in computational costs. Therefore, in practical conditions, it is important not only to find the configuration with the minimum error, but also to determine such a region of model parameters that provides acceptable accuracy within allowable time and memory costs.

The analysis of these limitations leads to the conclusion that there is a relevant scientific and applied problem of developing methods and software tools for validation of discrete mathematical models of acoustic wave propagation that provide correct harmonization of simulated and field signals, quantitative assessment of their agreement, and automated selection of parameter configurations suitable for use in real software and hardware complexes under limited computational resources.

The scientific task of the dissertation is to develop methods and software tools for validation of discrete mathematical models of acoustic wave propagation which, based on harmonization of numerical simulation results with field measurement data, provide improved reliability of model accuracy assessment and formation of the admissible parameter region of the numerical formulation according to the criteria of numerical correctness, computational feasibility, and sufficient accuracy.

The purpose of the dissertation is to improve the practical applicability of hydroacoustic software and hardware complexes by developing methods and software tools for validation of discrete acoustic wave propagation models that ensure correct comparison of simulated and field signals and automated selection of resource-efficient parameters of the numerical model at a specified accuracy level.

To achieve this purpose, the following tasks were solved in the dissertation:

1. Modern approaches to validation of numerical models of hydroacoustic fields, methods of digital signal processing, and approaches to assessing the agreement between simulation results and field measurements were analyzed.

2. The main limitations of existing approaches to direct comparison of simulated and experimental time series were identified, including differences in sampling rates, different noise structures, phase shifts, and the dependence of comparison results on signal preprocessing.

3. A method for preparing and harmonizing simulated and field signals was developed, including selection of harmonization parameters, resampling of time series, anti-aliasing filtering, normalization, and formation of comparable samples.

4. A procedure for spectral assessment of simulated and experimental signals was developed, with extraction of the informative component at the transmitter frequency and formation of amplitude characteristics suitable for subsequent statistical comparison.

5. The use of statistical metrics for assessing the agreement between numerical simulation results and experimental data was substantiated, including normalized error indicators that make it possible to quantify the degree of model suitability for a given application scenario.

6. A method for determining parameters and the admissible region of their values for a discrete mathematical model of acoustic wave propagation was developed, based on sequential selection of configurations according to the criteria of numerical correctness, computational feasibility, and threshold accuracy.

7. Experimental verification of the proposed methods was carried out using field hydroacoustic data from the open SWellEx-96 dataset, and the achieved compromise between accuracy and computational costs was evaluated.

8. Software tools were implemented that automate the stages of data preparation, spectral-statistical assessment, comparison of simulated and field signals, and formation of the admissible parameter region of the numerical model.

The object of the research is the process of developing software for validation of discrete mathematical models of acoustic wave propagation.

The subject of the research is methods and software tools for validation of discrete mathematical models of acoustic wave propagation based on comparison of simulation results with field measurement data under limited computational resources.

The dissertation improves a method for validation of mathematical models of acoustic wave propagation based on comparison of numerical simulation results with field measurement data using standard accuracy metrics. Unlike existing approaches, the proposed method provides automated harmonization of sampling rates of simulated and experimental signals, preliminary filtering, resampling, spectral extraction of the useful component, and statistical accuracy assessment on harmonized data series. This enables correct comparison of simulation results with field measurements in cases where direct comparison of time series is mathematically incorrect.

For the first time, a method has been developed for determining the parameters and the admissible region of their values for a discrete mathematical model of acoustic wave propagation, ensuring the required accuracy according to selected metrics while satisfying numerical correctness and computational feasibility constraints. The method is based on sequential filtering of parameter configurations according to a cascade of criteria. First, configurations that do not satisfy numerical correctness conditions are excluded. Next, variants that exceed allowable resource constraints in terms of execution time or memory usage are filtered out. After that, only those configurations remain that provide a sufficient level of accuracy according to the specified metric of comparison with experimental data. If necessary, the method can be supplemented with a self-consistency check relative to a more accurate reference configuration.

For the first time, a modular software architecture for validation of mathematical models of acoustic wave propagation has also been developed. It implements the proposed methods and supports connection of numerical model implementations, loading

and preparation of field data, signal harmonization, spectral-statistical accuracy assessment, calculation of error metrics, and automated determination of the admissible parameter region of the model. This architecture provides the possibility of integrating the developed software tool into hydroacoustic software and hardware complexes.

Experimental verification of the proposed solutions was carried out on test and field data. For practical testing of the method for determining model parameters, the open SWellEx-96 dataset and acoustic wave numerical simulation tools were used. During the experiments, procedures were implemented for harmonizing simulated and measured signals, bringing data to a common sampling rate, estimating time delay in a narrow band around the transmitter frequency, scaling signals by amplitude and phase, and final comparison using the normalized error metric NMAE.

The experimental results confirmed the practical feasibility of automated selection of a resource-efficient configuration while maintaining acceptable accuracy. For the considered experimental fragment, the simulation time was reduced by approximately 2.96 times without exceeding the established error threshold $\text{NMAE} \leq 0.2$. This corresponds to a reduction in execution time by approximately 66.2% compared with the baseline configuration. The obtained results show that the proposed approach makes it possible not only to assess model accuracy, but also to practically select such numerical formulation parameters that provide an acceptable balance between accuracy and computational costs.

The practical significance of the obtained results lies in the creation of a software tool and algorithmic procedures that provide reproducible validation of mathematical models of acoustic wave propagation within software and hardware complexes. The developed solutions make it possible to automate comparison of numerical simulation results with field measurements, reduce the dependence of assessment on manual parameter tuning, improve the validity of selecting numerical model configurations, and reduce simulation time while maintaining the specified accuracy level.

The proposed methods and software tools can be used in the development, modernization, and testing of specialized hydroacoustic software and hardware complexes, in tasks of experimental verification of numerical models, in systems

supporting series of simulation runs, as well as in research and educational activities for training specialists in software engineering, mathematical modeling, and digital signal processing.

Keywords: software engineering, software architecture, validation and verification of mathematical models, acoustic waves, digital signal processing, hydroacoustic signal modeling, spectral analysis, algorithmic data processing, model parameters, numerical correctness, optimization of computing resources, integrated hardware–software system, statistical metrics.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті у фахових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням категорії «Б» [1–4]:

1. Гейко О. О. Забезпечення правильності комп'ютерних моделей через верифікацію та валідацію. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського*. 2023. Том 34(73). № 4. С. 30–37.

DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/06>

URL: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2023/4_2023/6.pdf

2. Гейко О. О., Варава І. А. Еталонна архітектура для програмної платформи верифікації математичних моделей. *Наукові праці Міжрегіональної академії управління персоналом. Інформаційні технології та суспільство*. 2024. Вип. 2(13). С. 17–25.

DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.2.3>

URL: <https://journals.maup.com.ua/index.php/it/article/view/3934>

Внесок Гейка О. О.: запропоновано архітектурну структуру програмної платформи верифікації математичних моделей, визначено склад основних модулів та підготовлено основний текст статті.

Внесок Варава І. А.: сформульовано концептуальні засади побудови платформи, уточнено науково-методичні положення та здійснено наукове редагування статті.

3. Гейко О. О., Варава І. А. Особливості програмних рішень в області верифікації і валідації чисельних моделей. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2025.

DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2025.27.3.354592>

URL: <https://drsp.ipri.kiev.ua/article/view/354592>

Внесок Гейка О. О.: виконано аналіз програмних рішень у сфері верифікації та валідації чисельних моделей, узагальнено вимоги до програмних засобів та підготовлено текст статті.

Внесок Варави І. А.: визначено наукову постановку дослідження, уточнено критерії порівняння програмних рішень та здійснено редагування статті.

4. Гейко О. О., Варави І. А., Пуха Г. С., Дембіцький В. В., Вдовина А. В. Метод валідації чисельних моделей поширення гідроакустичних хвиль з узгодженням частот дискретизації та спектральної оцінки. *Системні технології*. Вип. 2 (163) 2026. С. 23-34.

DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-163-2026-03>

URL: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/2293>

Внесок Гейка О. О.: розроблено основний метод валідації чисельних моделей за натурними даними, включно з узгодженням частот дискретизації, ресемплінгом, спектральним виділенням корисної складової та статистичним оцінюванням узгодженості; підготовлено основний текст статті.

Внесок Варави І. А.: сформульовано постановку задачі, визначено методологічні вимоги до процедури валідації та здійснено наукове редагування статті.

Внесок Пухи Г. С.: взято участь в обговоренні прикладних аспектів використання методу в гідроакустичних задачах та в уточненні практичних умов його застосування.

Внесок Дембіцького В. В.: взято участь в аналізі чисельних аспектів реалізації методу та перевірці узгодженості окремих етапів алгоритму обробки даних.

Внесок Вдовиної А. В.: виконано допоміжну підготовку експериментальних даних, перевірку окремих обчислювальних процедур та оформлення результатів дослідження.

Публікації у матеріалах наукових конференцій [5–8]:

5. Гейко О. О. Методи валідації математичних моделей. *XX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики»* (25–28 квітня 2023 р.). URL: https://iate.kpi.ua/uploads/p_21_72711255.pdf

6. Гейко О. О., Варава І. А. Валідація математичних моделей статистичним методом. *Збірник матеріалів III Міжнародної науково-технічної конференції «Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку»*. Київ, 30 листопада 2023 року. Київ: Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, 2023. С. 110–111.

URL: https://dspace.nadpsu.edu.ua/bitstream/123456789/4626/1/III_MHTK_VITI_2023_сайт.pdf

Внесок Гейка О. О.: сформульовано статистичний підхід до валідації математичних моделей, підготовлено матеріали доповіді та узагальнено основні результати.

Внесок Варава І. А.: уточнено наукову постановку задачі та здійснено редагування матеріалів конференції.

7. Гейко О. О., Варава І. А. Проблематика валідації математичних моделей. *Збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 125-й річниці КІІІ ім. Ігоря Сікорського «Сучасні аспекти інженерії програмного забезпечення»*.

URL: https://ipze.kpi.ua/wp-content/uploads/2024/03/Збірник_тез_Сучасні_аспекти_інженерії_ПЗ_14.12.2023-1.pdf

Внесок Гейка О. О.: виконано постановку проблеми валідації математичних моделей, узагальнено основні труднощі практичного застосування та підготовлено тези.

Внесок Варава І. А.: уточнено науковий контекст дослідження та здійснено редагування матеріалів конференції.

8. Гейко О. О., Варава І. А. Інструменти представлення математичних формул в програмному забезпеченні. *Збірник матеріалів 2-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні аспекти інженерії програмного забезпечення»*.

URL: https://ipze.kpi.ua/wp-content/uploads/2025/08/Збірник_тез_Сучасні_аспекти_інженерії_ПЗ_№2.pdf

Внесок Гейка О. О.: виконано аналіз інструментів подання математичних формул у програмному забезпеченні, систематизовано вимоги до їх використання та підготовлено тези.

Внесок Варави І. А.: уточнено методичні аспекти подання математичних виразів у програмних системах та здійснено редагування матеріалів конференції.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	22
ВСТУП.....	24
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ВАЛІДАЦІЇ ТА ОЦІНКИ ЯКОСТІ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ГІДРОАКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ	35
1.1. Особливості чисельного моделювання та проблеми валідації гідроакустичних моделей	36
1.1.1. Загальна характеристика чисельних моделей гідроакустичних полів та необхідність валідації чисельних моделей	37
1.1.2. Аналіз існуючих підходів до валідації чисельних гідроакустичних моделей.....	40
1.1.3. Переваги та недоліки існуючих підходів до валідації.....	43
1.2. Методи узгодження часових рядів та підготовки даних для валідації гідроакустичних моделей	45
1.2.1. Ресемплінг як базовий метод узгодження часових рядів.....	47
1.2.2. Інтерполяція та децимація: переваги, недоліки та обмеження застосування	49
1.2.3. Фільтрація сигналів та запобігання ефекту аліасингу при зміні частоти дискретизації	51
1.2.4. Вибір цільової частоти дискретизації та довжини вибірки	53
1.2.5. Джерела похибок при підготовці даних для валідації та вимоги до коректного узгодження сигналів	55
1.2.6. Метрики оцінювання узгодженості модельних і експериментальних сигналів	58
1.2.7. Особливості використання часових і спектральних ознак у задачах валідації.....	60
1.3. Спектральні та статистичні методи оцінки якості математичних моделей гідроакустичних полів	62
1.3.1. Статистичні метрики оцінки точності та їх інтерпретація	65
1.3.2. Необхідність автоматизованого визначення допустимих параметрів моделі	67
1.3.3. Вплив обчислювальних ресурсів на придатність чисельної моделі до практичного використання.....	69

1.3.4. Постановка задачі спектрально-статистичної валідації моделі та відбору її параметричних конфігурацій.....	70
Висновки до Розділу 1	72
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ВАЛІДАЦІЇ ТА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ	74
2.1. Постановка завдання валідації математичних моделей гідроакустичних полів.....	74
2.2. Алгоритм підготовки та узгодження експериментальних і модельних даних	77
2.3. Спектральна та статистична оцінка точності математичних моделей	81
2.3.1. Формування спектральних представлень сигналів	81
2.3.2. Виділення амплітуди корисного сигналу.....	83
2.3.3. Статистичні метрики узгодженості.....	83
2.3.4. Перевірки чисельної коректності дискретної постановки	84
2.3.5. Інтерпретація результатів оцінки	85
2.3.6. Місце етапу оцінки точності в загальній схемі методу.....	86
2.4. Метод визначення області допустимих параметрів дискретної моделі за критеріями коректності, ресурсів і точності	86
2.4.1. Апріорний фільтр чисельної коректності.....	88
2.4.2. Фільтр ресурсної здійсненності.....	89
2.4.3. Фільтр достатньої точності за метрикою.....	89
2.4.4. Перевірка самоузгодженості	90
2.4.5. Формування області допустимих параметрів	91
2.4.6. Інтерпретація результатів та практичне використання області параметрів	92
2.4.7. Місце методу формування області параметрів у загальній структурі методу вибору параметрів моделі за критеріями точності та ресурсної здійсненності	93
Висновки до Розділу 2	94
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДІВ ВАЛІДАЦІЇ ТА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ	96
3.1. Вихідні дані та програмна реалізація експериментальних досліджень	97

3.1.1. Натурні дані та вибір фрагмента для порівняння	97
3.1.2. Програмні засоби та бібліотеки	99
3.2. Узгодження “вимірювання–модель” та обчислення метрики точності	99
3.2.1. Визначення робочої частоти f_0 та постановка вузькосмугового порівняння	100
3.2.2. Узгодження сигналів та побудова огинаючої	101
3.2.3. Метрика NMAE як кількісна оцінка узгодженості	102
3.3. Параметричний простір конфігурацій та протокол серійних прогонів ...	103
3.3.1. Параметри чисельної постановки та їхній вплив на результат	104
3.3.2. Ресурсний критерій та методика вимірювання часу	104
3.3.3. Логіка серійного перебору та двоетапний відбір	105
3.4. Результати та аналіз компромісу “точність–ресурси”	106
3.5. Відтворюваність експерименту та програмна автоматизація	108
Висновки до Розділу 3	109
РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ВАЛІДАЦІЇ ТА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ У ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ КОМПЛЕКСАХ	111
4.1. Вимоги до програмного комплексу валідації	111
4.2. Розробка архітектури програмного засобу валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль	117
4.2.1. Логічний компонент обробки та підготовки даних сенсора	121
4.2.2. Логічний компонент підготовки постановки та керування чисельним моделюванням	121
4.2.3. Контур валідації як окремий логічний компонент	122
4.2.4. Логічний компонент каскадного відбору конфігурацій і формування області параметрів	122
4.2.5. Представлення результатів, сховища даних та керування артефактами експерименту	123
4.2.6. Динамічна взаємодія компонентів при валідації та підборі параметрів	124
4.3. Реалізація процесів завантаження даних і запуску моделювання	127
4.4. Реалізація алгоритмів підготовки та обробки сигналів	131
4.5. Реалізація алгоритмів спектральної та статистичної оцінки	136

4.6. Реалізація модуля відбору конфігурацій та формування області допустимих параметрів	150
4.7. Демонстрація результатів роботи та оцінка ефективності створеного методу	154
Висновки до Розділу 4	180
ВИСНОВКИ.....	183
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	187
ДОДАТОК А	199
ДОДАТОК Б.....	202
ДОДАТОК В.....	204
ДОДАТОК Г	206
ДОДАТОК Д.....	215

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГАС – гідроакустична станція

ПАК – програмно-апаратний комплекс

ПЗ – програмне забезпечення

ЦОС – цифрова обробка сигналів

CFL (*Courant–Friedrichs–Lewy condition*) – критерій чисельної стійкості

DSP (*Digital Signal Processing*) – цифрова обробка сигналів

FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*) – метод скінченних різниць у часовій області

FFT (*Fast Fourier Transform*) – швидке перетворення Фур'є

k-Wave – програмний інструментарій чисельного моделювання акустичних хвиль

SWellEx-96 – відкритий натурний набір гідроакустичних експериментальних даних

MAE (*Mean Absolute Error*) – середня абсолютна похибка

MSE (*Mean Squared Error*) – середньоквадратична похибка

NMAE (*Normalized Mean Absolute Error*) – нормалізована середня абсолютна похибка

PPW (*Points Per Wavelength*) – кількість вузлів сітки на довжину хвилі

PML (*Perfectly Matched Layer*) – ідеально узгоджений поглинальний шар

$a(t)$ – огибаюча сигналу

$A(f)$ – амплітудний спектр сигналу

c – швидкість поширення акустичної хвилі у середовищі, м/с

E – значення метрики похибки

E_{thr} – порогове допустиме значення метрики

f – частота, Гц

f_0 – робоча частота (частота випромінювача), Гц

f_s – частота дискретизації, Гц

$H\{\}$ – перетворення Гільберта

M – витрати оперативної пам'яті

N – кількість відліків сигналу

N_t – кількість часових кроків моделювання

N_x, N_y – кількість вузлів сітки за просторовими координатами

$p(t)$ – акустичний тиск як функція часу

R – ресурсний критерій

$s(t)$ – часовий сигнал

$\hat{s}(t)$ – узгоджений або перетворений сигнал

$s_e(t)$ – сигнал натурного вимірювання

$s_m(t)$ – сигнал, отриманий у результаті чисельного моделювання

$S(f)$ – спектр сигналу

t – час, с

T_{mod} – час чисельного моделювання

T_s – період дискретизації, с

$v(t)$ – коливальна швидкість частинок середовища

x, y – просторові координати, м

Δt – часовий крок чисельного моделювання, с

$\Delta x, \Delta y$ – просторові кроки розрахункової сітки, м

ε – мале додатне число для уникнення ділення на нуль

Θ – множина параметрів чисельної моделі

Θ_{adm} – область допустимих конфігурацій параметрів

$\theta \in \Theta$ – окрема конфігурація параметрів моделі

λ – довжина хвилі, м

τ – часовий лаг (затримка) між сигналами

$\varphi(f)$ – фазовий спектр сигналу

Ω – область моделювання

$\partial\Omega$ – межа області моделювання

$\mathcal{F}\{\}$ – перетворення Фур'є.

ВСТУП

Актуальність теми

Сучасний розвиток програмно-апаратних комплексів спостереження, моніторингу, навігації та аналізу гідроакустичних полів безпосередньо пов'язаний із використанням математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль у водному середовищі. Такі моделі застосовуються для прогнозування характеристик акустичного поля, аналізу взаємодії хвиль із середовищем, оцінювання параметрів джерел і приймачів, а також для підтримки прийняття інженерних рішень під час розробки та експлуатації спеціалізованих гідроакустичних систем. Водночас практична цінність чисельного моделювання визначається не лише фізичною адекватністю обраної математичної постановки, але й достовірністю програмної реалізації методів підготовки, обробки та порівняння отриманих результатів із даними натурних вимірювань.

У задачах програмної інженерії для науково-технічних комплексів особливого значення набуває не просто побудова чисельної моделі, а забезпечення її валідації, тобто підтвердження того, що результати моделювання є достатньо узгодженими з реальними експериментальними даними для конкретних сценаріїв використання. На відміну від верифікації, яка спрямована на перевірку правильності програмної реалізації математичного алгоритму, валідація орієнтована на оцінку придатності моделі для відтворення реального фізичного процесу. Для гідроакустичних задач така валідація є складною через багатофакторний характер середовища, залежність результату від параметрів дискретизації, граничних умов, характеристик джерела та приймача, а також від способу попередньої обробки вимірюваних сигналів.

Однією з ключових проблем при зіставленні результатів чисельного моделювання з натурними вимірюваннями є несумісність «сирих» часових рядів. Частота дискретизації модельного сигналу визначається параметрами чисельної схеми, кроком сітки, часовим кроком та фізичними властивостями середовища,

тоді як вимірювальні гідроакустичні станції працюють із фіксованими характеристиками реєстрації. Унаслідок цього пряме порівняння часових реалізацій є математично некоректним і може призводити до хибних висновків щодо якості моделі. Отже, задача валідації потребує розробки спеціалізованих методів узгодження сигналів, які забезпечують коректне порівняння різночастотних даних без втрати їх фізичного змісту. Саме така постановка обґрунтована в першій статті, де показано, що коректне зіставлення досягається через узгодження частот дискретизації, ресемплінг, антиаліасингову фільтрацію, спектральне виділення корисної складової та подальше статистичне оцінювання узгодженості.

Ще однією важливою проблемою є те, що точність чисельної моделі не може розглядатися ізольовано від її обчислювальної вартості. Підвищення точності за рахунок уточнення дискретизації, збільшення кількості вузлів на довжину хвилі або посилення поглинаючих граничних шарів, як правило, супроводжується різким зростанням часу виконання та вимог до пам'яті. У прикладних системах, де потрібно виконувати серії прогонів, аналізувати багато сценаріїв або працювати в умовах обмежених ресурсів, ручний вибір параметрів моделі стає недостатньо надійним, трудомістким і погано відтворюваним. Це зумовлює потребу в методі, який би формалізував відбір параметрів чисельної постановки не лише за критерієм точності, а за сукупністю вимог: чисельної коректності, ресурсної здійсненності та порогової узгодженості з натурними даними. У межах цієї роботи під чисельною постановкою дискретної моделі розуміється сукупність параметрів чисельної реалізації математичної моделі, які визначають спосіб дискретизації простору і часу, параметри розрахункової сітки, граничні умови, параметри поглинальних шарів, умови стійкості та інші налаштування чисельного розв'язувача, що впливають на точність результату моделювання і витрати обчислювальних ресурсів.

Практична значущість проблеми підтверджується результатами експериментальної перевірки на відкритому гідроакустичному наборі даних SWellEx-96, де показано, що автоматизований відбір ресурсно-ефективної

конфігурації дозволяє забезпечити прийнятну точність за метрикою NMAE при суттєвому скороченні часу моделювання. Для розглянутого фрагмента було досягнуто приблизно 2,96-разове зменшення часу розрахунку без перевищення встановленого порогу похибки, що підтверджує доцільність переходу від ручного налаштування до формалізованої процедури визначення області допустимих параметрів моделі.

Таким чином, актуальною є науково-прикладна задача розробки методів і програмних засобів валідації дискретних математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль, які забезпечують: коректне узгодження результатів чисельного моделювання з натурними вимірюваннями; спектрально-статистичну оцінку узгодженості модельних і експериментальних сигналів; автоматизований відбір конфігурацій моделі, що одночасно є чисельно коректними, ресурсно здійсненими та достатньо точними. Розв'язання цієї задачі має істотне значення для підвищення достовірності моделювання у програмно-апаратних комплексах гідроакустичного призначення та відповідає напрямку спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення», оскільки поєднує методи математичного моделювання, цифрової обробки сигналів, алгоритмічної формалізації та програмної реалізації процедур валідації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційне дослідження виконане відповідно до планів наукової та науково-технічної діяльності Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» і кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці та є частиною досліджень у межах ініціативної роботи: «Методи та засоби супроводження системи комп'ютерного моделювання експериментів з проведення та оцінки математичних моделей складної технічної системи». Номер державної реєстрації роботи: 0122U202052. Терміни виконання: початок – 01.01.2023 р., закінчення – 31.12.2025 р. Власний внесок здобувача – розробка методу валідації математичних моделей гідроакустичних полів.

Мета та завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є підвищення точності методів валідації дискретних математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль шляхом порівняння узгоджених змодельованих і натурних сигналів для вибору допустимих параметрів моделі в програмно-апаратних комплексах.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовано такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні підходи до валідації чисельних моделей гідроакустичних полів, методи цифрової обробки сигналів та способи оцінювання узгодженості результатів моделювання з натурними вимірюваннями.

2. Виявити обмеження існуючих підходів до прямого порівняння модельних і експериментальних часових рядів, зумовлені розбіжністю частот дискретизації, різною структурою шумів і фазовими зміщеннями.

3. Розробити метод підготовки й узгодження сигналів, що включає вибір параметрів узгодження, ресемплінг часових рядів, антиаліасингову фільтрацію, нормування та формування зіставних вибірок.

4. Розробити процедуру спектральної оцінки модельних і експериментальних сигналів із виділенням інформативної складової на частоті випромінювача та формуванням амплітудних характеристик, придатних для статистичного порівняння.

5. Обґрунтувати та реалізувати статистичні метрики оцінювання узгодженості результатів моделювання з експериментальними даними.

6. Розробити метод визначення параметрів і області їх допустимих значень для дискретних математичних моделей на основі послідовного відбору конфігурацій за критеріями чисельної коректності, ресурсної здійсненності та порогової точності.

7. Провести експериментальну перевірку запропонованих методів на натурних гідроакустичних даних і оцінити досягнутий компроміс між точністю та обчислювальними витратами.

8. Реалізувати програмні засоби, що забезпечують автоматизацію етапів підготовки даних, спектрально-статистичної оцінки та формування області допустимих параметрів чисельних моделей.

Об'єкт та предмет дослідження

Об'єктом дослідження є процеси аналізу вимог, розроблення, валідації та забезпечення якості програмного забезпечення для математичного моделювання розповсюдження акустичних хвиль у програмно-апаратних комплексах.

Предметом дослідження є методи та програмні засоби узгодження й оцінювання відповідності змодельованих і натурних гідроакустичних сигналів, а також визначення допустимих параметрів дискретних математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль за критеріями точності, чисельної коректності та ресурсної здійсненності.

Для розв'язання поставлених у дисертаційній роботі завдань використано такі **методи дослідження**: методи цифрової обробки сигналів, зокрема інтерполяцію, децимацію, антиаліасингову фільтрацію, віконну обробку, швидке перетворення Фур'є та процедури виділення амплітуди на заданій частоті; статистичні методи оцінювання узгодженості та точності модельних і експериментальних даних; методи перевірки чисельної коректності дискретної постановки, зокрема контроль просторової роздільної здатності та стійкості за критерієм CFL; методи формального опису параметричного простору конфігурацій та каскадного відбору допустимих рішень; методи програмної інженерії для реалізації програмного комплексу валідації математичних моделей гідроакустичних полів. Експериментальна перевірка виконувалась на основі натурних гідроакустичних даних SWellEx-96 із використанням чисельного моделювання у двовимірній постановці як практичного компромісу між фізичною змістовністю та обчислювальною вартістю серійних прогонів.

Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна отриманих у дисертаційній роботі результатів полягає в тому, що:

1. Удосконалено метод валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль, що базується на порівнянні результатів чисельного моделювання з даними натурних вимірювань за стандартними метриками точності. На відміну від існуючих підходів, у яких порівняння модельних і експериментальних даних здебільшого виконується без комплексного врахування різної частоти дискретизації, шумових складових, спектральної структури сигналу та чисельної коректності моделі, запропонований метод відрізняється автоматизованим узгодженням частот дискретизації модельних і натурних сигналів, попередньою фільтрацією, ресемплінгом, спектральним виділенням корисної складової сигналу та контролем чисельної коректності розрахунків. Це забезпечує коректне формування зіставних рядів даних і підвищує достовірність метричної оцінки точності математичної моделі.

2. Вперше розроблено метод визначення параметрів та області їх допустимих значень для дискретної математичної моделі розповсюдження акустичних хвиль, які забезпечують необхідну точність моделі за визначеними метриками за одночасного виконання умов чисельної коректності та ресурсної здійсненності. На відміну від існуючих підходів, у яких параметри чисельної моделі часто обираються емпірично або переважно за критерієм точності без формального врахування обчислювальних обмежень, запропонований метод відрізняється послідовним каскадним відбором конфігурацій за критеріями чисельної коректності, допустимих витрат обчислювальних ресурсів, порогової точності та, за потреби, самоузгодженості. Це дає змогу формувати не одну окрему конфігурацію, а область допустимих параметрів, придатних для практичного застосування в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

3. Вперше розроблено модульну архітектуру програмного забезпечення валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль, що реалізує удосконалений метод валідації моделей за даними натурних вимірювань та метод визначення параметрів і області їх допустимих значень. На відміну від існуючих програмних рішень, які зазвичай орієнтовані або на окреме чисельне моделювання, або на окрему обробку сигналів, або на ручне порівняння результатів,

запропонована архітектура відрізняється інтеграцією в єдиний програмний контур підсистем завантаження й підготовки натурних даних, запуску чисельного моделювання, узгодження частот дискретизації, спектрально-статистичного оцінювання, обчислення метрик точності та автоматизованого відбору ресурсно-ефективних конфігурацій моделі. Це забезпечує підвищення відтворюваності процесу валідації та практичну придатність програмного засобу для використання у складі програмно-апаратних комплексів гідроакустичного призначення.

Практичне значення отриманих результатів

Практичне значення отриманих у дисертаційній роботі результатів полягає у створенні методів, алгоритмічних процедур і програмних засобів, які забезпечують підвищення достовірності та ефективності валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль у водному середовищі за даними натурних вимірювань.

Розроблений метод валідації дозволяє автоматизувати процес порівняння результатів чисельного моделювання з даними натурних гідроакустичних вимірювань за рахунок узгодження частот дискретизації, попередньої фільтрації, ресемплінгу, спектрального виділення корисної складової сигналу та застосування статистичних метрик оцінювання точності. Це забезпечує коректну інтерпретацію результатів моделювання у випадках, коли пряме порівняння модельних і експериментальних часових рядів є математично некоректним, та зменшує ризик прийняття хибних інженерних рішень під час використання моделей у програмно-апаратних комплексах.

Запропонований метод визначення параметрів та області їх допустимих значень забезпечує відтворюваний відбір конфігурацій дискретної моделі, які одночасно є чисельно коректними, ресурсно здійсненими за обмеженнями часу виконання та/або пам'яті й забезпечують необхідний рівень точності за заданими метриками порівняння з експериментальними даними. Це дає змогу перейти від ручного або емпіричного підбору параметрів чисельної моделі до формалізованої процедури автоматизованого вибору ресурсно-ефективних конфігурацій.

Практична ефективність запропонованих рішень підтверджена експериментальною перевіркою на натурних гідроакустичних даних SWellEx-96. Для розглянутого експериментального фрагмента автоматизований вибір ресурсно-ефективної конфігурації дозволив скоротити час чисельного моделювання приблизно у 2,96 раза без перевищення встановленого порогу похибки $NMAE \leq 0,2$. У відносному вираженні це відповідає зменшенню часу виконання приблизно на 66,2 % порівняно з базовою конфігурацією.

Отримані кількісні результати підтверджують практичну спрямованість мети дисертаційного дослідження, оскільки розроблені методи та програмні засоби забезпечують не лише оцінювання точності математичної моделі, а й вибір таких параметрів чисельної постановки, які дозволяють зберегти прийнятний рівень точності за суттєвого скорочення обчислювальних витрат.

Розроблені програмні засоби можуть бути використані під час розроблення, модернізації та тестування програмних комплексів моделювання гідроакустичних полів, у системах експериментальної перевірки чисельних моделей, у задачах порівняння результатів моделювання з натурними вимірюваннями, а також у науково-дослідній та навчальній діяльності при підготовці фахівців у галузі інженерії програмного забезпечення та інформаційних технологій.

Особистий внесок здобувача

Усі основні наукові результати, що становлять зміст дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Автором сформульовано постановку задачі валідації дискретних математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль за даними натурних вимірювань, обґрунтовано необхідність узгодження модельних і експериментальних сигналів за частотою дискретизації, розроблено процедури попередньої фільтрації, ресемплінгу, спектрального виділення корисної складової сигналу, перевірок чисельної коректності та статистичного оцінювання узгодженості. Також автором запропоновано підхід до визначення області допустимих параметрів моделі за критеріями чисельної коректності, ресурсної здійсненності та достатньої точності, а також розроблено структуру модульного програмного забезпечення для реалізації зазначених методів.

У публікації [1] здобувачем проаналізовано підходи до забезпечення правильності комп'ютерних моделей через процедури верифікації та валідації, уточнено відмінності між верифікацією та валідацією, визначено їх роль у життєвому циклі програмного забезпечення математичного моделювання та обґрунтовано необхідність використання цих процедур для підвищення достовірності результатів комп'ютерного моделювання.

У публікації [2] здобувачем запропоновано еталонну архітектуру програмної платформи верифікації математичних моделей, визначено склад основних функціональних модулів такої платформи, описано логіку їх взаємодії та обґрунтовано доцільність модульної побудови програмного забезпечення для підтримки процедур перевірки математичних моделей.

У публікації [3] здобувачем виконано аналіз особливостей сучасних програмних рішень у сфері верифікації та валідації чисельних моделей, узагальнено їх переваги й обмеження, визначено вимоги до програмних засобів підтримки валідації моделей та обґрунтовано необхідність створення спеціалізованого програмного інструментарію для задач порівняння результатів чисельного моделювання з експериментальними даними.

У публікації [4] здобувачем запропоновано метод валідації чисельних моделей поширення гідроакустичних хвиль за даними натурних вимірювань, який включає узгодження частот дискретизації модельних і експериментальних сигналів, ресемплінг, антиаліасингову фільтрацію, спектральне виділення корисної складової на частоті випромінювача та статистичне оцінювання узгодженості на підготовлених рядах даних. Здобувачем також обґрунтовано необхідність контролю чисельної коректності розрахунків перед виконанням метричного порівняння.

У публікації [5] здобувачем сформульовано загальну проблематику валідації математичних моделей, визначено основні труднощі зіставлення результатів моделювання з реальними даними та обґрунтовано необхідність застосування формалізованих процедур оцінювання адекватності математичних моделей.

У публікації [6] здобувачем запропоновано статистичний підхід до валідації математичних моделей, обґрунтовано використання кількісних метрик для оцінювання узгодженості модельних і експериментальних даних та показано доцільність застосування статистичних критеріїв для підвищення об'єктивності оцінювання якості моделі.

У публікації [7] здобувачем розглянуто проблематику валідації математичних моделей у контексті інженерії програмного забезпечення, узагальнено основні обмеження практичного застосування процедур валідації та визначено напрями подальшого розвитку програмних засобів підтримки валідації моделей.

У публікації [8] здобувачем проаналізовано інструменти представлення математичних формул у програмному забезпеченні, систематизовано вимоги до їх використання та показано їх значення для створення програмних засобів, орієнтованих на роботу з математичними моделями, алгоритмами обробки даних і результатами чисельного моделювання.

У публікаціях, виконаних у співавторстві, здобувачеві належать основні результати, пов'язані з постановкою задачі, аналізом предметної області, розробленням алгоритмічних процедур, формуванням архітектурних рішень, підготовкою експериментальних сценаріїв, інтерпретацією отриманих результатів та підготовкою основного тексту публікацій.

Апробація результатів дисертації

Основні наукові положення, результати та практичні напрацювання дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на науково-практичних конференціях, присвячених питанням математичного моделювання, валідації моделей, інженерії програмного забезпечення, цифрової обробки сигналів та суміжних прикладних напрямів. Під час апробації було представлено результати, пов'язані з розробленням методів валідації математичних моделей, застосуванням статистичних підходів до оцінювання узгодженості модельних і натурних даних, а також із програмною реалізацією засобів підтримки валідації моделей розповсюдження акустичних хвиль.

Результати дисертаційного дослідження апробовано на таких наукових заходах:

1. Гейко О. О. Методи валідації математичних моделей // XX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики», 25–28 квітня 2023 р.

2. Гейко О. О., Варава І. А. Валідація математичних моделей статистичним методом // Збірник матеріалів III Міжнародної науково-технічної конференції «Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку», 30 листопада 2023 року, м. Київ. Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, 2023. С. 110–111.

У зазначених доповідях відображено проміжні та підсумкові результати дослідження, що стосуються формалізації процедур валідації математичних моделей, обґрунтування використання кількісних критеріїв порівняння модельних і експериментальних даних, а також практичного застосування статистичних методів для підвищення об'єктивності оцінювання адекватності моделі. Апробація підтвердила актуальність обраної тематики, доцільність запропонованих підходів і практичну значущість отриманих результатів для створення програмних засобів валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 8 наукових праць, у яких відображено основні результати дослідження, зокрема питання верифікації та валідації математичних і чисельних моделей, архітектури програмних засобів їх підтримки, статистичних методів оцінювання, а також методів валідації та вибору параметрів моделей розповсюдження акустичних хвиль. Із них 4 статті опубліковано у наукових виданнях [1–4], 4 праці — у матеріалах міжнародних науково-практичних і науково-технічних конференцій [5–8].

Обсяг та структура дисертації. Дисертаційна робота загальним обсягом 217 сторінок машинописного тексту складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел із 130 найменувань. Дисертація містить 50 рисунків, 3 таблиці та 5 додатків.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ВАЛІДАЦІЇ ТА ОЦІНКИ ЯКОСТІ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ГІДРОАКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

Побудова та практичне застосування математичних моделей гідроакустичних полів потребують не лише коректної фізико-математичної постановки, а й науково обґрунтованих підходів до оцінювання достовірності отриманих результатів. Теоретичні основи аналізу підводного звуку, хвилевідного поширення та прикладної гідроакустики висвітлено у працях [9–12]. Історичний розвиток акустики як науки та формування сучасних уявлень про хвильові процеси розглянуто в праці [13]. Теоретичні основи океанської та підводної акустики докладно висвітлено у працях [14–23]. У задачах розповсюдження акустичних хвиль у водному середовищі точність моделювання визначається сукупною дією багатьох чинників: властивостей середовища, способу дискретизації, вибору чисельного методу, параметрів джерела та приймача, а також особливостей програмної реалізації алгоритмів обчислення. У зв'язку з цим аналіз сучасних підходів до валідації та оцінки якості математичних моделей є необхідною передумовою для формування науково обґрунтованих методів їх подальшого вдосконалення.

Особливого значення ця проблема набуває в умовах використання чисельних моделей у складі програмно-апаратних комплексів гідроакустичного призначення, де результат моделювання має не лише теоретичне, а й прикладне значення. У таких системах недостатньо встановити факт працездатності моделі; необхідно підтвердити, що вона забезпечує достатній рівень узгодженості з натурними вимірюваннями, а її параметри можуть бути вибрані з урахуванням обмежень часу виконання, обсягу пам'яті та вимог до відтворюваності результатів. Тому валідація розглядається не як допоміжний етап, а як невід'ємна складова процесу розробки й застосування математичних моделей акустичних хвиль.

Аналіз сучасного стану досліджень у сфері чисельного моделювання гідроакустичних полів дозволяє виділити основні проблеми валідації таких

моделей і підходи до їх розв'язання. Термінологія підводної акустики використовується відповідно до міжнародного стандарту. Значну увагу приділено питанням узгодження модельних і експериментальних даних, методам підготовки часових рядів до порівняння, а також спектральним і статистичним засобам оцінювання якості моделі. Це дозволяє виявити обмеження існуючих підходів і обґрунтувати доцільність розроблення спеціалізованих методів валідації для задач розповсюдження акустичних хвиль.

Отримані результати аналізу формують підґрунтя для постановки наукової задачі дослідження та визначення напрямів подальших розробок, зокрема щодо створення методу валідації чисельних моделей поширення гідроакустичних хвиль з узгодженням частот дискретизації та спектральної оцінки, а також методу вибору параметрів моделі за критеріями точності та ресурсної здійсненності.

1.1. Особливості чисельного моделювання та проблеми валідації гідроакустичних моделей

Сучасні дослідження гідроакустичних процесів значною мірою базуються на використанні чисельних методів моделювання [24–25], які дозволяють відтворювати процеси розповсюдження акустичних хвиль у водному середовищі з урахуванням складних фізичних та геометричних факторів. Такі методи широко застосовуються для аналізу характеристик акустичних сигналів, оцінювання ефективності гідроакустичних систем, а також для прогнозування поведінки акустичних полів у різних умовах середовища. У прикладних задачах підводної акустики такі підходи використовуються для інтерпретації підводного звуку, аналізу ефективності сонарних систем і розв'язання задач зіставлення акустичних полів у середовищі [26–27].

Чисельне моделювання дає змогу проводити дослідження в умовах, які є складними або неможливими для реалізації у натурних експериментах. Зокрема, це стосується моделювання великих акваторій, екстремальних глибин або специфічних конфігурацій джерел і приймачів. Разом з тим, результати чисельного

модельовання мають прикладну цінність лише за умови їх відповідності реальним фізичним процесам, що зумовлює необхідність обов'язкової валідації моделей.

1.1.1. Загальна характеристика чисельних моделей гідроакустичних полів та необхідність валідації чисельних моделей

Чисельні моделі гідроакустичних полів базуються на математичному описі процесів розповсюдження звукових хвиль у водному середовищі [17]. Фізична коректність такого опису пов'язана з урахуванням фундаментальних закономірностей поширення звуку в стисливих середовищах, енергетичних характеристик хвильового процесу та умов формування акустичного поля. В основу таких моделей покладено диференціальні рівняння, які описують акустичний тиск, швидкість частинок середовища та взаємодію хвиль з межами області [18]. Залежно від обраного підходу, ці рівняння можуть розв'язуватися різними чисельними методами, що визначає точність і ресурсоемність моделі.

Важливою особливістю чисельного моделювання є дискретизація простору та часу. Просторова дискретизація визначається параметрами розрахункової сітки, а часовий крок обирається з урахуванням умов стійкості та точності чисельного методу [19]. Саме ці параметри безпосередньо впливають на частоту дискретизації вихідних часових рядів, які формуються в процесі моделювання.

Перевагою чисельних моделей є можливість гнучкого налаштування параметрів середовища, джерел сигналу та сценаріїв моделювання. Однак зі зменшенням кроку сітки та часового кроку різко зростають витрати обчислювальних ресурсів, що обмежує практичне застосування високоточних моделей.

Незважаючи на теоретичну обґрунтованість чисельних методів, жодна модель не може повністю відтворити реальний фізичний процес. Причинами цього є спрощення фізичних припущень, обмеження розрахункової області, похибки дискретизації та чисельні наближення. У зв'язку з цим валідація моделей за даними натурних експериментів є ключовим етапом оцінки їх достовірності.

Метою валідації є визначення ступеня відповідності результатів чисельного моделювання реальним вимірюванням, а також виявлення областей, у яких модель демонструє недостатню точність. Результати валідації використовуються для коригування параметрів моделі, вибору оптимальної конфігурації та оцінки меж її застосування.

Однією з найбільш суттєвих проблем валідації чисельних моделей гідроакустичних полів є різна природа формування модельних та експериментальних даних [32]. Гідроакустичні станції реєструють сигнали з фіксованою апаратною частотою дискретизації, яка не змінюється в процесі експерименту. Натомість частота дискретизації чисельної моделі визначається обраним часовим кроком і може істотно відрізнятися від частоти вимірювального обладнання. Під час моделювання також необхідно враховувати поглинання звуку у морській воді та шумові чинники середовища.

У результаті часові ряди, отримані в ході моделювання та натурних вимірювань, мають різну кількість відліків на одиницю часу. Пряме порівняння таких рядів у часовій області є математично некоректним і може призводити до хибних висновків щодо точності моделі. Навіть за візуальної схожості сигналів кількісні показники похибки можуть бути суттєво спотворені.

Для конкретизації технічних передумов валідації доцільно зіставити типові чисельні моделі поширення підводного звуку за їх методичною основою, контекстом застосування та обмеженнями. За результатами аналізу моделей BELLHOP, KRAKEN, RAM і SCOOTER, наведеного у [35], їхні характеристики узагальнено в таблиці 1.1. Для подальшого розроблення методу валідації чисельних моделей поширення гідроакустичних хвиль з узгодженням частот дискретизації та спектральної оцінки така класифікація визначає, які властивості моделі слід контролювати перед порівнянням з натурними даними.

Таблиця 1.1 – Характеристика типових моделей поширення підводного звуку

Модель	Методична основа	Доцільний контекст застосування	Основне обмеження для валідації
BELLHOP	трасування променів	високочастотні сценарії, зокрема для глибоководних або схилових умов	на низьких частотах у мілководді може не враховувати модальну інтерференцію та дифракційні ефекти
KRAKEN	нормальні моди	низькочастотні мілководні задачі та слабо залежні від дальності середовища	за високих частот зростає кількість мод; на крутих схилах погіршується точність через модальне зв'язування
RAM	параболічне рівняння	низько- та середньочастотні задачі, середовища із залежністю параметрів від дальності	потребує дрібнішої сітки на високих частотах; зворотне розсіювання враховується обмежено
SCOOTER	швидке поле / інтегрування за хвильовим числом	плоскі, незалежні від дальності середовища; еталон для порівняння у плоских умовах	орієнтований на незалежні від дальності постановки; зворотне розсіювання не є основним режимом моделі

Отже, вибір чисельної моделі має враховувати не лише очікувану точність, а й фізичні припущення, частотний діапазон, геометрію середовища та обчислювальні обмеження. Це безпосередньо пов'язує огляд існуючих моделей із подальшим розробленням методу вибору параметрів моделі за критеріями точності та ресурсної здійсненності.

Додатковою проблемою є вплив параметрів дискретизації на спектральні характеристики сигналів. Некоректне узгодження частот дискретизації може призводити до втрати інформативних частотних складових або появи аліасингу [33–34, 36], що унеможливорює коректний аналіз результатів.

1.1.2. Аналіз існуючих підходів до валідації чисельних гідроакустичних моделей

У сучасних дослідженнях гідроакустичних полів валідація чисельних моделей здебільшого розглядається як завершальний етап моделювання, на якому результати розрахунку порівнюються з натурними або експериментальними даними. Такий підхід є природним, оскільки лише зіставлення з реальними вимірюваннями дозволяє оцінити, наскільки побудована модель здатна відтворювати фізично значущі властивості процесу поширення акустичних хвиль. Разом з тим аналіз наукових джерел показує, що у більшості робіт основна увага приділяється або математичній постановці задачі, або чисельному методу її розв'язання, тоді як власне процедура валідації часто описується фрагментарно, без формалізації підготовки даних, критеріїв прийнятності та обмежень застосованих метрик.

У загальному вигляді підходи до валідації чисельних гідроакустичних моделей можна поділити на декілька груп.

Перша група охоплює підходи, орієнтовані на якісне порівняння результатів моделювання з експериментальними даними [37–39]. У таких роботах зазвичай аналізуються форми сигналів, наявність або відсутність виражених піків, часові затримки, порядок появи окремих компонент, а також загальний характер зміни амплітуди у просторі або часі. Перевагою цього підходу є простота інтерпретації, оскільки дослідник безпосередньо бачить, чи відтворює модель очікувану фізичну картину. Однак така валідація значною мірою залежить від суб'єктивної оцінки дослідника, є слабо формалізованою і малопридатною для серійного автоматизованого аналізу.

Друга група включає підходи, засновані на порівнянні у часовій області [40–41]. У цьому випадку модельний і експериментальний сигнали розглядаються як часові ряди, для яких обчислюються показники відхилення, кореляції або подібності. Формально такий підхід є більш строгим, ніж візуальне порівняння, однак його коректність залежить від того, чи дійсно сигнали приведені до єдиного формату подання. Якщо ж модельний і експериментальний сигнали мають різну

частоту дискретизації, різну довжину, різний часовий зсув або відмінний масштаб амплітуд, то пряме порівняння у часовій області втрачає математичну коректність. Саме ця проблема є центральною для задач валідації гідроакустичних моделей, оскільки модель генерує сигнал із частотою дискретизації, що визначається параметрами чисельної схеми, тоді як вимірювальна апаратура працює з фіксованою частотою реєстрації. Накладання таких рядів без попереднього узгодження може призводити до хибних висновків щодо якості моделі.

Третя група підходів базується на спектральному аналізі [42–44]. Для гідроакустичних задач цей напрям є особливо важливим, оскільки багато практичних сценаріїв пов'язані з вузькосмуговими або квазітональними джерелами, а інформативна ознака сигналу часто проявляється не стільки у часовій формі, скільки у частотному вмісті. Перехід до спектрального подання дозволяє зменшити вплив часових зсувів, виокремити корисну частотну складову на фоні шуму та здійснювати порівняння за більш стійкими ознаками. Саме тому у сучасних методах цифрової обробки сигналів широко застосовуються FFT, віконна обробка, оцінювання спектральної амплітуди та вузькосмугові критерії порівняння. Водночас спектральний підхід також потребує суворого дотримання умов коректності: узгодженої частоти дискретизації, однакової довжини вибірки, контролю аліасингу, правильного вибору вікна та інтерпретації спектральних піків.

Четверта група — це комбіновані підходи, у яких порівняння проводиться одночасно в часовій та частотній областях або за допомогою проміжних представлень, наприклад огибаючої, аналітичного сигналу, вузькосмугової фільтрації чи крос-кореляційної оцінки лагу [45–49]. Такий клас підходів є найбільш перспективним для практичної валідації, оскільки дозволяє враховувати як структурну подібність сигналів, так і їх енергетичний та спектральний зміст. У випадку натурних даних доцільним є не пряме порівняння «сирих» осцилограм, а вузькосмугове порівняння огибаючих амплітуди після оцінки лагу та приведення сигналів до спільної частоти дискретизації. Такий підхід забезпечує підвищену стійкість до шумів і малих фазових відхилень у реальних записах. До споріднених напрямів акустичної обробки, що розширюють можливості зіставлення сигналів у

складних середовищах, належать методи часового обернення, просторово-часової та модельно-орієнтованої обробки, які також спрямовані на підвищення інформативності та стійкості оцінювання.

Окремо слід виділити підходи, в яких валідація розглядається не лише як перевірка точності, а як елемент більш широкої процедури калібрування, вибору параметрів або встановлення меж застосовності моделі. Для складних гідроакустичних задач це особливо важливо, оскільки на результати істотно впливають параметри просторової дискретизації, часового кроку, граничних умов, властивостей джерела та середовища. У таких умовах валідація фактично перетворюється на ітеративний алгоритмічний процес: модель запускається для серії конфігурацій, результати зіставляються з натурними даними, а далі обираються параметри, що забезпечують прийнятну якість відтворення. Проте далеко не всі підходи формалізують цю процедуру належним чином; часто вибір параметрів виконується евристично, без чіткої фіксації причин відхилення конфігурацій і без урахування ресурсних обмежень.

Таким чином, аналіз існуючих підходів свідчить про наявність кількох важливих тенденцій. По-перше, спостерігається перехід від суто візуальної або експертної оцінки до кількісних критеріїв. По-друге, дедалі більшого значення набуває спектральний аналіз як засіб виділення інформативної складової сигналу. По-третє, у прикладних задачах стає очевидною недостатність підходів, що ігнорують проблему узгодження дискретизації. По-четверте, валідація дедалі частіше розглядається в контексті автоматизації, проте наявні рішення здебільшого не забезпечують повного інтегрованого циклу «підготовка даних – контроль коректності – обчислення метрики – відбір конфігурації».

Саме ця обставина і визначає наукову прогалину, яку заповнює дана дисертаційна робота. Існує розрив між класичними методами цифрової обробки сигналів та специфічними вимогами до автоматизованої валідації гідроакустичних моделей: наявні підходи не формують єдиного алгоритмічного рішення, яке б поєднувало ресемплінг, спектральну селекцію та статистичну оцінку в межах єдиного програмного контуру. Тому подальше дослідження спрямовано на

формування методу валідації чисельних моделей поширення гідроакустичних хвиль з узгодженням частот дискретизації та спектральної оцінки.

1.1.3. Переваги та недоліки існуючих підходів до валідації

Проведений аналіз дає підстави стверджувати, що жоден із існуючих підходів до валідації чисельних гідроакустичних моделей не є універсальним, а їх придатність залежить від характеру задачі, типу доступних даних, ступеня шумності вимірювань, обчислювальних можливостей та рівня формалізації дослідження.

Якісні підходи, засновані на візуальному аналізі сигналів або полів, мають перевагу швидкої інтерпретації. Вони дозволяють виявляти грубі невідповідності між моделлю та реальністю, оцінювати порядок відбиттів, загальну структуру хвильової картини та фізичну правдоподібність отриманих результатів. Для первинного аналізу або експертного контролю такий підхід є корисним, проте його головним недоліком є низька відтворюваність. Результат оцінювання істотно залежить від досвіду дослідника, а отже погано піддається стандартизації. Крім того, він не придатний для автоматизованих серійних експериментів, у яких необхідно порівняти десятки або сотні конфігурацій.

Методи порівняння у часовій області є більш формальними й дозволяють застосовувати класичні статистичні критерії. Вони зручні тоді, коли сигнали синхронізовані, мають однакову дискретизацію, подібну тривалість та низький рівень шуму. Але для реальних гідроакустичних даних ці умови рідко виконуються автоматично. Часові сигнали можуть мати зсуви, нерівномірну структуру шуму, відмінності в амплітудному масштабі та різну кількість відліків на одиницю часу. За таких умов часове порівняння без спеціальної попередньої обробки стає джерелом систематичних помилок. Саме тому пряме зіставлення «сирих» сигналів слід вважати математично некоректним.

Спектральні методи мають важливу перевагу: вони дозволяють перейти від безпосереднього порівняння часової форми сигналу до аналізу його частотної

структури. Для задач, у яких джерело має виражену тональну складову, це дає змогу виділити фізично значущу компоненту і зменшити вплив шумів, локальних спотворень або дрібних фазових зсувів. Такий підхід дозволяє порівнювати вже не повні сигнали, а більш стійкі та інформативні амплітудні ряди.

Разом з тим спектральні підходи також мають обмеження. По-перше, вони чутливі до вибору вікна, довжини вибірки, частотної роздільної здатності та ефектів витікання спектра. По-друге, якщо цільова частота обрана некоректно або відсутня виражена корисна складова, то оцінка втрачає фізичний зміст. По-третє, перехід до спектрального подання сам по собі не усуває проблему різної дискретизації; навпаки, некоректне узгодження сигналів може спричинити спотворення спектральних піків і появу аліасингу. Отже, спектральний аналіз є сильним інструментом лише тоді, коли він вбудований у правильно організований ланцюг попередньої обробки.

Комбіновані підходи, що поєднують вузькосмугову фільтрацію, оцінку лагу, приведення до спільної дискретизації, використання огибаючої та подальше обчислення метрик, є найбільш стійкими з прикладної точки зору. Саме такі рішення дозволяють працювати з натурними записами, які містять шуми, фазові зсуви, багатотонові компоненти та інші артефакти реальних умов реєстрації. Коректне порівняння «вимірювання – модель» забезпечується відтворюваною процедурою підготовки даних, що включає визначення частоти випромінювача, оцінку часової затримки, масштабування та порівняння огибаючої вузькосмугової компоненти за вибраною метрикою. Такий підхід краще відповідає реальним умовам експерименту, ніж порівняння повних сирих осцилограм.

Окремою перевагою сучасних формалізованих підходів є можливість автоматизації. Якщо процедура підготовки та оцінювання чітко описана, то її можна реалізувати як програмний алгоритм, придатний для серійних запусків, повторюваного тестування та накопичення експериментальних результатів. Це безпосередньо пов'язує задачу валідації з інженерією програмного забезпечення, оскільки предметом розробки стає не лише математичний метод, а й програмний засіб, що реалізує повний контур контролю достовірності моделі.

Водночас головним недоліком більшості існуючих підходів залишається те, що вони оцінюють модель переважно лише за точністю, залишаючи поза увагою питання чисельної коректності та ресурсної здійсненності. На практиці це означає, що конфігурація з мінімальною похибкою може бути непридатною для серійних прогонів через надто високий час виконання або надмірні витрати пам'яті. Навпаки, надто груба дискретизація зменшує час обчислень, але призводить до чисельної дисперсії, втрати корисної складової або спотворень, пов'язаних із недостатніми поглинаючими шарами. Отже, у прикладних задачах слід шукати не одну «найточнішу» конфігурацію, а область конфігурацій, які є одночасно коректними, достатньо точними та ресурсно допустимими.

Таким чином, переваги існуючих підходів полягають у поступовому переході до більш формального, кількісного й автоматизованого оцінювання. Недоліки ж пов'язані з тим, що ці підходи часто розглядають окремі етапи — ресемплінг, спектральний аналіз, метрики точності, перевірки параметрів — ізольовано один від одного. У результаті відсутнє цілісне програмно-алгоритмічне рішення, яке б забезпечувало коректне, відтворюване і ресурсно орієнтоване порівняння результатів моделювання з натурними даними.

1.2. Методи узгодження часових рядів та підготовки даних для валідації гідроакустичних моделей

Процес валідації чисельних моделей гідроакустичних полів неможливий без попередньої підготовки вхідних даних. Основною задачею цього етапу є забезпечення коректної порівнюваності модельних та експериментальних сигналів, які, як правило, формуються з різними частотами дискретизації, що визначають різну кількість відліків сигналу на одиницю часу. Узгодження часових рядів є необхідною передумовою застосування як часових, так і спектральних методів аналізу.

Однією з ключових проблем, що виникають при валідації чисельних моделей гідроакустичних полів, є різниця у частотах дискретизації модельних та

експериментальних сигналів. Ця проблема має принциповий характер і зумовлена різною фізичною та технологічною природою формування даних у процесі чисельного моделювання та натурних вимірювань.

У гідроакустичних експериментах сигнали реєструються вимірювальними станціями з фіксованою апаратною частотою дискретизації, яка визначається параметрами аналого-цифрового перетворювача та обирається з урахуванням необхідної смуги частот. Такий підхід забезпечує стабільність і повторюваність вимірювань, однак не передбачає адаптації до особливостей подальшого аналізу або порівняння з результатами чисельного моделювання.

На відміну від експериментальних даних, частота дискретизації у чисельних моделях формується непрямо і залежить від вибору часового кроку моделювання. Часовий крок визначається з урахуванням просторового кроку розрахункової сітки, швидкості розповсюдження хвиль у середовищі та умов чисельної стійкості. Унаслідок цього частота дискретизації модельного сигналу може істотно відрізнятись від частоти дискретизації експериментальних даних і не бути з нею кратною.

Різниця частот дискретизації призводить до того, що модельні та експериментальні часові ряди мають різну кількість відліків на одиницю часу, а також різну часову структуру. У такій ситуації безпосереднє порівняння сигналів у часовій області є математично некоректним. Навіть у випадку зовнішньої подібності сигналів значення статистичних метрик, обчислених без попереднього узгодження даних, можуть не відображати реальну точність моделі.

Окрему складність становить вплив різної частоти дискретизації на спектральні характеристики сигналів. При некоректному узгодженні даних можливе спотворення амплітудних характеристик, зсув спектральних піків або поява аліасингу. Це унеможливорює коректне використання спектральних методів аналізу, які є ключовими у задачах оцінки гідроакустичних моделей.

Таким чином, проблема різної частоти дискретизації не є суто технічною, а має фундаментальний характер і безпосередньо впливає на достовірність результатів валідації. Її ігнорування призводить до хибних висновків щодо якості

математичних моделей, що підтверджує необхідність розробки спеціалізованих методів узгодження часових рядів.

1.2.1. Ресемплінг як базовий метод узгодження часових рядів

Ресемплінг є одним з базових методів цифрової обробки сигналів, який застосовується для узгодження часових рядів із різними частотами дискретизації [50–55]. У задачах валідації чисельних моделей гідроакустичних полів ресемплінг відіграє ключову роль, оскільки саме він забезпечує можливість коректного порівняння модельних та експериментальних сигналів у єдиному часовому просторі.

Нехай дискретний сигнал, отриманий у результаті чисельного моделювання або експериментальних вимірювань, описується послідовністю відліків $x[n]$, яка сформована з частотою дискретизації f_s . Завдання ресемплінгу полягає у формуванні нового сигналу $y[m]$ з іншою частотою дискретизації f_t що забезпечує узгодження з відповідним сигналом для подальшого аналізу.

У загальному вигляді процес ресемплінгу може бути описаний співвідношенням:

$$y[m] = x\left(\frac{mf_s}{f_t}\right), \quad (1.1)$$

де значення x визначаються шляхом інтерполяції, оскільки аргумент, як правило, не є цілим числом. Дане співвідношення відображає фундаментальну ідею ресемплінгу – перехід між часовими сітками з різною щільністю дискретизації без зміни фізичного змісту сигналу.

У випадках, коли частоти дискретизації f_s та f_t є кратними, процес ресемплінгу може бути спрощений і реалізований шляхом цілочисельної децимації або інтерполяції. Проте в практичних задачах валідації гідроакустичних моделей такі умови виконуються рідко, що зумовлює необхідність застосування дробового ресемплінгу.

Дробовий ресемплінг реалізується шляхом послідовного виконання операцій інтерполяції з коефіцієнтом L та децимації з коефіцієнтом M , де відношення частот дискретизації визначається як:

$$\frac{f_t}{f_s} = \frac{L}{M}. \quad (1.2)$$

У цьому випадку сигнал спочатку переводиться до проміжної частоти дискретизації шляхом вставлення додаткових відліків, а потім проріджується до необхідної цільової частоти.

Важливою особливістю процесу ресемплінгу є його вплив на спектральні характеристики сигналу. Зміна частоти дискретизації без попередньої фільтрації призводить до накладання спектральних компонент, що проявляється у вигляді аліасингу. Для запобігання цьому ефекту необхідно обмежити спектр сигналу до корисної смуги частот перед виконанням операції децимації.

З точки зору обчислювальної ефективності класичні алгоритми ресемплінгу можуть бути надмірно ресурсоемними, особливо при обробці довготривалих гідроакустичних сигналів або великої кількості експериментів. Повна інтерполяція сигналу з подальшою фільтрацією потребує значних витрат машинного часу та пам'яті, що обмежує можливість застосування таких підходів у практичних системах моделювання.

Таким чином, ресемплінг є необхідним етапом підготовки даних у задачах валідації чисельних моделей гідроакустичних полів, однак його реалізація потребує ретельного вибору алгоритмів та параметрів. Це зумовлює актуальність розробки оптимізованих методів ресемплінгу, які забезпечують коректне узгодження часових рядів при мінімальних обчислювальних витратах і створюють основу для подальшого спектрального та статистичного аналізу.

1.2.2. Інтерполяція та децимація: переваги, недоліки та обмеження застосування

Інтерполяція та децимація є базовими операціями цифрової обробки сигналів, на основі яких реалізується процес ресемплінгу. У задачах узгодження часових рядів ці операції використовуються для зміни частоти дискретизації сигналів з метою приведення модельних та експериментальних даних до єдиної часової сітки. Разом з тим, особливості застосування інтерполяції та децимації в задачах валідації чисельних моделей гідроакустичних полів потребують детального аналізу їх переваг та обмежень.

Інтерполяція сигналів

Інтерполяція полягає у збільшенні частоти дискретизації сигналу шляхом вставлення додаткових відліків між наявними значеннями [52–53]. Нехай дискретний сигнал $x[n]$, сформований з частотою дискретизації f_s . Інтерполяція з коефіцієнтом L може бути формально описана як:

$$x_I[n] = \begin{cases} x\left[\frac{n}{L}\right], n = kL, \\ 0, \text{інакше,} \end{cases} \quad (1.3)$$

де $k \in \mathbb{Z}$ – індекс дискретного сигналу, що належить множині цілих чисел.

У теоретичному описі цифрових сигналів індекс визначається на всій множині цілих чисел, хоча у практичних реалізаціях обробляється лише скінченний фрагмент сигналу.

У такому вигляді інтерпольований сигнал містить нульові значення між початковими відліками, що призводить до появи додаткових спектральних компонент. Для відновлення коректної форми сигналу необхідне застосування згладжувального фільтра, який усуває штучно введені високочастотні складові.

До переваг інтерполяції належать її універсальність та можливість формального узгодження часових сіток у випадках, коли необхідно підвищити частоту дискретизації сигналу. Водночас інтерполяція супроводжується збільшенням обсягу даних та зростанням обчислювальних витрат, що є критичним при обробці довготривалих гідроакустичних сигналів.

Децимація сигналів

Децимація є операцією, оберненою до інтерполяції, і полягає у зменшенні частоти дискретизації сигналу шляхом відкидання частини відліків [54–55]. Формально децимація з коефіцієнтом може бути записана у вигляді:

$$x_D[n] = x[nM], \quad (1.4)$$

де $M \in \mathbb{N}$.

Основною перевагою децимації є зменшення обсягу даних та скорочення обчислювальних витрат на подальшу обробку сигналу. Проте децимація без попередньої фільтрації призводить до ефекту аліасингу, який проявляється у накладанні спектральних компонент і втраті інформативних частот.

Для запобігання аліасингу перед виконанням децимації необхідно застосовувати низькочастотні фільтри, які обмежують спектр сигналу до половини нової частоти дискретизації. Така фільтрація є обов'язковою умовою коректної децимації, однак вона істотно збільшує обчислювальну складність алгоритму.

Комбіноване використання інтерполяції та децимації

У задачах дробового ресемплінгу інтерполяція та децимація використовуються спільно. Сигнал спочатку інтерполюється з коефіцієнтом L , після чого виконується децимація з коефіцієнтом M , що дозволяє реалізувати перехід між довільними частотами дискретизації. Такий підхід є універсальним і широко застосовується у практиці цифрової обробки сигналів.

Разом з тим, комбіноване використання інтерполяції та децимації призводить до суттєвого зростання обчислювальних витрат, оскільки потребує обробки сигналу на проміжній частоті дискретизації, яка може значно перевищувати початкову. У задачах валідації чисельних моделей це обмежує можливість використання класичних алгоритмів ресемплінгу без додаткової оптимізації.

Обмеження застосування у задачах валідації моделей

Аналіз інтерполяції та децимації показує, що класичні підходи до ресемплінгу не завжди є оптимальними для задач валідації гідроакустичних моделей. Основними обмеженнями є висока обчислювальна складність,

необхідність ретельного вибору параметрів фільтрації та ризик спотворення спектральних характеристик сигналу.

У контексті валідації математичних моделей важливим є не лише коректне узгодження часових рядів, але й збереження фізичного змісту сигналів при мінімальних витратах ресурсів. Це зумовлює необхідність пошуку спеціалізованих алгоритмів ресемплінгу, які враховують специфіку чисельного моделювання та забезпечують баланс між точністю і ефективністю обчислень.

1.2.3. Фільтрація сигналів та запобігання ефекту аліасингу при зміні частоти дискретизації

Фільтрація сигналів є невід’ємним етапом підготовки даних при зміні частоти дискретизації та відіграє ключову роль у забезпеченні коректності процесу ресемплінгу. У задачах валідації чисельних моделей гідроакустичних полів фільтрація використовується для обмеження спектру сигналу до корисної смуги частот і запобігання виникненню аліасингу, який може суттєво спотворювати результати аналізу.

Ефект аліасингу виникає у випадку, коли сигнал містить частотні компоненти, що перевищують половину частоти дискретизації. При зниженні частоти дискретизації такі компоненти відображаються у нижчу частотну область, накладаючись на корисний спектр. У задачах гідроакустики це є особливо критичним, оскільки навіть незначні спектральні спотворення можуть призводити до неправильної інтерпретації фізичних процесів розповсюдження звуку у водному середовищі.

Згідно з теоремою Котельникова–Шеннона [58–59], для коректного представлення сигналу з максимальною частотою частота дискретизації повинна задовольняти умову (1.5):

$$f_s \geq 2f_{max}. \quad (1.5)$$

У випадку децимації сигналу ця умова повинна виконуватися відносно нової, зниженої частоти дискретизації. Це зумовлює необхідність попереднього обмеження спектра сигналу перед виконанням операції проріджування.

Низькочастотна фільтрація при децимації

Для запобігання аліасингу при зменшенні частоти дискретизації застосовується низькочастотна фільтрація, яка обмежує спектр сигналу до частоти

$$f_c \leq \frac{f_s}{2M}, \quad (1.6)$$

де M – коефіцієнт децимації.

Найбільш поширеними у практиці цифрової обробки сигналів є FIR-фільтри (Finite Impulse Response), які забезпечують лінійну фазову характеристику та чисельну стійкість. Вихідний сигнал після фільтрації може бути записаний у вигляді

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} h[k]x[n-k], \quad (1.7)$$

де $h[k]$ – коефіцієнти фільтра,

N – довжина імпульсної характеристики.

Застосування FIR-фільтрів дозволяє ефективно пригнічувати небажані високочастотні складові, однак зі збільшенням довжини фільтра зростає обчислювальна складність алгоритму [60]. Це є суттєвим недоліком при обробці великих масивів гідроакустичних даних.

Фільтрація при інтерполяції

У випадку інтерполяції фільтрація використовується для усунення спектральних копій, які виникають у результаті вставлення нульових відліків. Після інтерполяції спектр сигналу містить додаткові складові, розташовані на кратних частотах, що не несуть фізичної інформації.

Для відновлення коректної форми сигналу застосовується згладжувальний низькочастотний фільтр, який виділяє основну спектральну компоненту та пригнічує паразитні частоти. Вимоги до такого фільтра визначаються коефіцієнтом інтерполяції та необхідною точністю відновлення сигналу.

Обчислювальні обмеження та оптимізація фільтрації

Класичні реалізації фільтрації передбачають обробку кожного відліку сигналу, що при високій частоті дискретизації та великій довжині сигналу призводить до значних витрат машинного часу. У задачах валідації чисельних моделей, де обробляються множинні сценарії моделювання та експериментальні дані, це може суттєво обмежувати практичну застосовність таких підходів.

Для зменшення обчислювальної складності використовуються оптимізовані методи фільтрації, зокрема поліфазні структури, які дозволяють поєднати операції фільтрації та децимації. Такий підхід забезпечує виконання обчислень лише для необхідних відліків сигналу, що дозволяє суттєво скоротити загальну кількість операцій без втрати точності.

Значення фільтрації у задачах валідації моделей

Аналіз методів фільтрації показує, що коректне запобігання аліасингу є обов'язковою умовою достовірної валідації чисельних моделей гідроакустичних полів. Недостатня або некоректна фільтрація може призводити до появи штучних спектральних компонент, які спотворюють результати спектрального та статистичного аналізу.

Таким чином, фільтрація сигналів у процесі ресемплінгу повинна розглядатися не як допоміжна операція, а як ключовий елемент підготовки даних. Це зумовлює необхідність розробки оптимізованих алгоритмів фільтрації, адаптованих до задач валідації чисельних моделей та орієнтованих на баланс між точністю та ефективністю обчислень.

1.2.4. Вибір цільової частоти дискретизації та довжини вибірки

Вибір цільової частоти дискретизації є одним із ключових етапів підготовки даних у задачах валідації чисельних моделей гідроакустичних полів. Від коректності цього вибору залежить не лише можливість узгодження модельних та експериментальних сигналів, але й точність подальшого спектрального та статистичного аналізу.

Цільова частота дискретизації повинна задовольняти кілька суперечливих вимог. З одного боку, вона має бути достатньо високою для коректного відтворення корисної частотної складової сигналу та збереження його фізичного змісту. З іншого боку, надмірно висока частота дискретизації призводить до зростання обсягу даних і підвищення обчислювальних витрат, що є небажаним у практичних задачах валідації чисельних моделей.

Нехай f_0 – базова (корисна) частота гідроакустичного сигналу, яка визначається параметрами джерела випромінювання або домінантною спектральною складовою експериментальних даних. Для коректного спектрального аналізу та запобігання аліасингу цільова частота дискретизації f_t повинна задовольняти умову (1.8):

$$f_t \geq 2f_0. \quad (1.8)$$

Разом з тим, у задачах спектрального аналізу важливим є не лише значення частоти дискретизації, але й довжина вибірки сигналу. Для ефективного використання алгоритмів швидкого перетворення Фур'є (FFT) доцільним є вибір такої частоти дискретизації, за якої кількість відліків у вибірці є степенем двійки [61–62]. Це дозволяє уникнути додаткового доповнення сигналу нулями та зменшити обчислювальні витрати.

З урахуванням зазначеного цільову частоту дискретизації доцільно визначати у вигляді

$$f_t = f_0 \times 2^k, \quad (1.9)$$

де $k \in \mathbb{Z}$ – ціле число, що визначає ступінь деталізації сигналу у часовій області.

У такому випадку довжина вибірки N , що відповідає одному періоду корисного сигналу, визначається як

$$N = \frac{f_t}{f_0} = 2^k. \quad (1.10)$$

Зазначене співвідношення забезпечує виконання умов для ефективного спектрального аналізу та спрощує подальшу обробку сигналів.

Процедура вибору цільової частоти дискретизації може бути реалізована у вигляді ітераційного алгоритму, який полягає у послідовному збільшенні значення

k до досягнення компромісу між точністю відтворення сигналу та обчислювальними витратами. Такий підхід дозволяє автоматизувати процес підготовки даних і зменшити вплив суб'єктивного вибору параметрів аналізу.

Некоректний вибір цільової частоти дискретизації може призводити до суттєвих помилок у результатах валідації. Занижене значення f_t спричиняє втрату інформативних спектральних компонент, тоді як завищене – призводить до надмірного зростання обсягу даних без істотного підвищення точності. Тому алгоритмічний підхід до вибору частоти дискретизації є необхідною умовою забезпечення достовірності результатів.

Таким чином, вибір цільової частоти дискретизації та відповідної довжини вибірки є важливим етапом підготовки даних у задачах валідації чисельних моделей гідроакустичних полів. Формалізація цього процесу створює основу для подальшої спектральної та статистичної оцінки якості моделей і дозволяє забезпечити баланс між точністю та ефективністю обчислень.

1.2.5. Джерела похибок при підготовці даних для валідації та вимоги до коректного узгодження сигналів

Однією з принципових відмінностей задачі валідації гідроакустичних моделей від багатьох інших задач обробки сигналів є те, що тут порівнюються дані різної природи. З одного боку, маємо сигнал, отриманий у результаті чисельного моделювання, тобто результат дискретного обчислювального процесу з наперед заданими параметрами сітки, часу, граничних умов і моделі джерела. З іншого боку, маємо натурний запис, сформований реальним фізичним процесом, виміряний апаратурою з власними характеристиками тракту реєстрації, частотою дискретизації, шумовими властивостями і, можливо, додатковими спотвореннями. Тому перед будь-яким статистичним або спектральним порівнянням постає задача узгодження цих сигналів.

Першим джерелом похибок є різна частота дискретизації. Якщо один сигнал містить більше відліків на одиницю часу, ніж інший, то їх пряме зіставлення не

відповідає умові однаковості дискретного простору. Це не просто технічна незручність, а фундаментальна причина викривлення метрик. Та сама фізична подія може бути представлена різною кількістю точок, а локальні особливості сигналу — по-різному відображені через різний часовий крок. Саме тому ресемплінг у задачах валідації виступає не допоміжною, а базовою процедурою.

Другим джерелом похибок є аліасинг, який виникає при некоректній зміні частоти дискретизації. Якщо перед зменшенням частоти дискретизації не виконати відповідну фільтрацію, то високочастотні компоненти спектра відобразяться у нижчих частотних діапазонах, спотворюючи амплітудну структуру сигналу. Для задач гідроакустики це критично, оскільки інформативна складова часто пов'язана з вузькою частотною смугою, а навіть незначні спектральні спотворення можуть істотно вплинути на оцінку узгодженості. Отже, будь-який коректний ресемплінг має супроводжуватися антиаліасинговою фільтрацією.

Третім важливим джерелом похибок є неузгодженість часових фрагментів. Навіть після приведення до спільної частоти дискретизації сигнали можуть описувати не зовсім однакові ділянки фізичного процесу. Це пов'язано з тим, що модельний сигнал формується у внутрішньому часовому масштабі чисельного експерименту, а натурний сигнал — у реальному часі спостереження. Невеликий лаг між сигналами, навіть якщо вони загалом відповідають одній фізичній події, може значно погіршити показники подібності у часовій області. Тому процедура узгодження має включати або явну оцінку лагу, або перехід до таких ознак, які менш чутливі до малих часових зсувів.

Четверте джерело похибок — відмінність амплітудних масштабів. Натурний сигнал залежить не тільки від властивостей середовища та джерела, але й від характеристик приймального тракту, чутливості апаратури, способу калібрування та інших факторів. У чисельному моделюванні амплітуди часто нормуються або формуються в умовних одиницях. Без спеціального приведення шкал пряме порівняння амплітуд стає некоректним, оскільки частина розбіжності буде зумовлена не фізичними властивостями моделі, а різницею систем представлення даних.

П'ятим джерелом похибок є шумова складова натурних вимірювань. Реальні гідроакустичні записи рідко являють собою чистий тон або ідеально відтворений сигнал. У них присутні шуми середовища, завади, інтерференційні компоненти, паразитні частоти та особливості апаратного тракту. Вимірний сигнал не є ідеальним тоном у часовій області, а тому порівняння лише за формою сирої осцилограми є суб'єктивним; натомість доцільно використовувати спектральні ознаки та вузькосмугові метрики.

Шостим джерелом похибок виступає некоректний вибір цільової частоти аналізу. Для багатотонових або складних сигналів недостатньо механічно взяти одну частоту з метаданих експерименту. Необхідно підтвердити її спектральну присутність у реальному вимірюваному фрагменті. Інакше можлива ситуація, коли порівняння виконується на частоті, що формально належить до сценарію випромінювання, але фактично не є вираженою в обраному сегменті запису. Це робить результат валідації малозмістовним.

Звідси впливають базові вимоги до коректного узгодження сигналів у задачі валідації. По-перше, сигнали мають бути приведені до спільної частоти дискретизації із застосуванням належної антиаліасингової фільтрації. По-друге, повинні бути узгоджені часові фрагменти та, за потреби, компенсований лаг. По-третє, необхідно привести амплітуди до зіставної шкали. По-четверте, корисна частотна складова повинна бути не лише задана номінально, а й підтверджена спектрально. По-п'яте, усі параметри обробки мають бути зафіксовані та відтворені, інакше результати валідації не можна вважати стабільними.

Саме виконання цих вимог перетворює підготовку даних з технічної операції на повноцінний алгоритмічний етап валідації. У межах цієї дисертації такий етап розглядається як обов'язкова умова достовірності подальшого спектрального й статистичного оцінювання, а не як допоміжний крок перед основним аналізом.

1.2.6. Метрики оцінювання узгодженості модельних і експериментальних сигналів

Одним із ключових питань у задачі валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль є вибір метрики, яка дозволяє кількісно оцінити ступінь узгодженості між результатами чисельного моделювання та натурними вимірюваннями. Саме метрика виконує роль формального інструмента, що переводить якісне уявлення про «схожість» сигналів у кількісний показник, придатний для порівняння різних конфігурацій моделі, аналізу серій експериментів та автоматизованого прийняття рішень.

У загальному випадку метрика валідації має відповідати кільком вимогам. По-перше, вона повинна бути чутливою до фізично значущих відмінностей між сигналами. По-друге, вона не повинна надмірно реагувати на неінформативні відхилення, зумовлені шумом, незначним часовим зміщенням або локальними артефактами обробки. По-третє, значення метрики має бути інтерпретованим з практичної точки зору, щоб дослідник або програмний модуль могли на його основі робити обґрунтований висновок про прийнятність моделі. По-четверте, обчислення метрики має бути достатньо простим і стійким для використання в автоматизованому контурі серійних прогонів.

У задачах порівняння часових рядів часто застосовуються класичні квадратичні та абсолютні метрики відхилення. Однією з найбільш поширених є середньоквадратична похибка. Її перевага полягає в тому, що вона сильніше штрафує великі відхилення між відповідними елементами сигналів, завдяки чому добре виявляє грубі розбіжності між моделлю та вимірюванням. Водночас така властивість є і обмеженням, оскільки поодинокі великі викиди або локальні шуми можуть істотно впливати на підсумковий результат. Крім того, середньоквадратична похибка залежить від масштабу даних, через що її значення не завжди легко інтерпретувати без додаткового нормування.

Альтернативою є середня абсолютна похибка, яка менш чутлива до поодиноких великих відхилень і краще відображає типову середню різницю між сигналами. У практичних задачах її перевагою є більш інтуїтивна інтерпретація,

однак без нормування вона також зберігає залежність від абсолютного масштабу амплітуд. Саме тому в умовах, коли модельні та експериментальні сигнали можуть мати різний рівень амплітуди, доцільно переходити до нормованих форм метрик.

Особливу цінність для задач валідації мають нормовані метрики, оскільки вони дозволяють оцінювати похибку у відносних величинах. Це важливо в тих випадках, коли абсолютна енергія або амплітуда сигналу може змінюватися внаслідок зовнішніх факторів, не пов'язаних безпосередньо з якістю математичної моделі. Нормована середня абсолютна похибка дає можливість отримати безрозмірний показник середнього відхилення, який легше порівнювати між різними сценаріями, конфігураціями та наборами даних. Саме така властивість робить її зручною для автоматизованого відбору допустимих параметрів моделі.

Окрему групу становлять кореляційні метрики, які орієнтовані не стільки на абсолютну різницю значень, скільки на ступінь структурної подібності між сигналами. Їх перевага полягає в тому, що вони дозволяють виявляти схожість форми сигналів навіть тоді, коли їх амплітудний масштаб відрізняється. Проте для задач валідації гідроакустичних моделей кореляція не завжди є достатньою, оскільки два сигнали можуть мати подібну форму, але суттєво різнитися за абсолютним рівнем або за амплітудою інформативної складової. Тому кореляційні критерії доцільно розглядати як допоміжні, а не як єдиний підсумковий показник.

Ще одним підходом є використання спектральних метрик. У цьому випадку порівняння здійснюється не за часовими реалізаціями сигналів, а за їх частотними характеристиками: спектральними амплітудами, енергетичними розподілами або значеннями в окремих частотних діапазонах. Для гідроакустичних задач такий підхід є особливо доцільним, якщо корисна інформація зосереджена у вузькій смузі навколо частоти випромінювача. Спектральна метрика дозволяє зменшити вплив часових зсувів і локальних осциляцій, натомість акцентуючи увагу на фізично значущих ознаках сигналу. Водночас її застосування вимагає коректного визначення цільової частоти, контролю частотної роздільної здатності та правильного тлумачення спектральних піків.

Важливо підкреслити, що жодна окрема метрика не може вважатися універсальною. Квадратичні критерії краще виявляють великі локальні відхилення, абсолютні — більш стійкі до викидів, нормовані — краще підходять для порівняння між різними сценаріями, а спектральні — краще відображають фізичну структуру вузькосмутових сигналів. Саме тому у задачі валідації доцільно не обмежуватися одним показником, а формувати систему оцінювання, у якій підсумкова метрика використовується разом із перевітками коректності сигналу, вираженості інформативної частотної компоненти та загальної придатності даних до порівняння.

Для цілей програмної реалізації особливо важливо, щоб метрика мала чітко визначені правила обчислення, була стійкою до повторного запуску та не залежала від суб'єктивного втручання користувача. У такому випадку вона стає не просто засобом оцінювання, а елементом алгоритму прийняття рішень. Саме ця вимога зумовлює необхідність розглядати метрики не ізольовано, а в контексті повної процедури валідації, де значення критерію інтерпретується лише після узгодження сигналів, фільтрації, нормування та виділення інформативної складової.

Таким чином, вибір метрики для задачі валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль повинен визначатися не лише математичною зручністю, але й фізичною змістовністю, стійкістю до артефактів, придатністю до автоматизації та можливістю використання у багатокритеріальному процесі відбору параметрів моделі.

1.2.7. Особливості використання часових і спектральних ознак у задачах валідації

Питання вибору ознак для порівняння модельних і експериментальних сигналів є центральним для будь-якої процедури валідації. У найпростішому випадку як ознаки розглядають безпосередні значення сигналу у часовій області. Такий підхід є природним і добре узгоджується з класичними статистичними

методами, однак у прикладних задачах гідроакустики він часто виявляється недостатньо стійким.

Часова форма сигналу є дуже чутливою до незначних фазових зміщень, часових лагів, локальних шумів і відмінностей у дискретизації. Навіть коли модель в цілому правильно відтворює фізичний процес, незначне зміщення в часі може призвести до істотного зростання похибки при поелементному порівнянні часових рядів. У результаті формується ситуація, коли сигнал виглядає фізично подібним, але метрика у часовій області демонструє незадовільний результат. Це особливо характерно для вузькосмугових гармонічних або квазігармонічних процесів, де мала фазова похибка здатна суттєво спотворити точкове зіставлення.

На відміну від цього, спектральні ознаки відображають не миттєву часову структуру сигналу, а його енергетичний і частотний зміст. Саме тому вони краще пристосовані до аналізу процесів, у яких головний інтерес становить наявність, рівень та просторовий розподіл вузькосмугової складової. У гідроакустичних задачах це дозволяє зосередитися на корисному сигналі, відокремивши його від неінформативного шумового фону та випадкових часових коливань.

Разом із тим перехід до спектральних ознак не означає повної відмови від часового аналізу. Навпаки, обидва типи ознак слід розглядати як взаємодоповнювальні. Часова область є зручною для виявлення затримок, переходових процесів, тривалості сигналу та загальної структури запису. Спектральна область, у свою чергу, є більш придатною для оцінювання частотного складу, рівня корисної компоненти та її порівняння між моделлю і натурним вимірюванням. Тому валідація, яка спирається лише на часові або лише на спектральні ознаки, часто виявляється неповною.

Для практичної реалізації це означає, що система валідації повинна використовувати часові ознаки на етапі попереднього узгодження сигналів, зокрема для вибору спільного фрагмента, оцінювання часового зсуву та контролю цілісності запису. Після цього доцільно переходити до спектрального представлення, де основне порівняння виконується за амплітудними характеристиками інформативної частотної складової. Такий підхід поєднує

переваги обох представлень і забезпечує вищу стійкість до факторів, які спотворюють пряме поелементне порівняння у часовій області.

Особливе значення має також питання вибору ознаки, яка використовуватиметься як фінальна підстава для обчислення метрики. Якщо порівнювати повні спектри, то в оцінку потрапляють як корисні, так і побічні компоненти, значна частина яких може бути зумовлена шумом або вторинними фізичними ефектами. Якщо ж виділити вузьку смугу навколо фізично значущої частоти, то оцінювання стає більш цілеспрямованим і краще відображає якість відтворення основної складової процесу. Саме тому у прикладних задачах часто доцільним є порівняння не повного спектра, а амплітуди або огибаючої у вибраному частотному діапазоні.

Отже, використання часових і спектральних ознак у задачі валідації має будуватися не за принципом взаємовиключення, а за принципом послідовного доповнення. Часові ознаки забезпечують коректне попереднє узгодження даних, тоді як спектральні — фізично змістовне і більш стійке фінальне порівняння. Саме така організація процедури найбільше відповідає вимогам автоматизованої валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль.

1.3. Спектральні та статистичні методи оцінки якості математичних моделей гідроакустичних полів

Після виконання узгодження часових рядів та приведення модельних і експериментальних сигналів до єдиної частоти дискретизації постає задача кількісної оцінки якості відтворення гідроакустичних сигналів чисельними моделями. На цьому етапі валідації застосовуються спектральні та статистичні методи аналізу, які дозволяють формалізувати ступінь відповідності між результатами моделювання та даними натурних вимірювань.

Вибір конкретного методу оцінки якості залежить від характеру сигналів, поставленої задачі та вимог до точності і ефективності обчислень. У практиці гідроакустичних досліджень жоден із підходів не використовується ізольовано, а їх

комбінування дозволяє отримати більш повну та об'єктивну оцінку якості математичних моделей.

Аналіз сигналів у часовій області

Аналіз сигналів у часовій області є найбільш інтуїтивно зрозумілим підходом до оцінки відповідності модельних та експериментальних даних. Він полягає у безпосередньому порівнянні часових рядів акустичного тиску або інших характеристик сигналу. Такий аналіз дозволяє виявити загальні особливості сигналу, зокрема затримки, зміну амплітуди, наявність спотворень або втрату окремих фрагментів сигналу.

Перевагою часового аналізу є його наочність та можливість швидкої первинної оцінки результатів моделювання. Водночас часовий аналіз є чутливим до фазових зсувів та не дозволяє коректно оцінити відповідність сигналів у випадку складної спектральної структури. Навіть незначний часовий зсув між сигналами може призводити до значного зростання статистичних похибок, що ускладнює інтерпретацію результатів.

Таким чином, часовий аналіз доцільно використовувати як допоміжний інструмент попередньої оцінки, який має бути доповнений методами аналізу у частотній області.

Аналіз сигналів у частотній області

Аналіз у частотній області дозволяє оцінити відповідність модельних та експериментальних сигналів за їх спектральними характеристиками. Для оцінювання спектральних характеристик сигналів доцільно використовувати класичні підходи до оцінки спектра потужності, зокрема усереднені оцінки, які забезпечують стійкіше виділення інформативних частотних компонент. У задачах гідроакустики частотний склад сигналу має принципове значення, оскільки процеси розповсюдження звукових хвиль у водному середовищі суттєво залежать від частоти.

Перехід до частотної області здійснюється за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Для дискретного сигналу $x[n]$, що складається з N відліків, спектральне представлення визначається як

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N}, \quad (1.11)$$

де $k = 0, 1, \dots, N - 1$.

Спектральний аналіз дозволяє виділити домінантні частотні компоненти, порівняти амплітудні та енергетичні характеристики сигналів і зменшити вплив фазових зсувів. Це робить його більш стійким до деяких типів спотворень порівняно з часовим аналізом.

Разом з тим, результати спектрального аналізу значною мірою залежать від параметрів обробки, зокрема довжини вибірки та типу віконної функції. Некоректний вибір цих параметрів може призводити до спектрального розтікання та спотворення амплітуд, що ускладнює кількісне порівняння результатів.

Обмеження спектрального аналізу та віконна обробка

При застосуванні спектрального аналізу до сигналів скінченної тривалості виникає ефект спектрального розтікання, який пов'язаний з неявним множенням сигналу на прямокутне вікно у часовій області. Формально віконна обробка може бути описана як

$$x_w[n] = x[n] \times w[n], \quad (1.12)$$

де $x[n]$ – вихідний сигнал,

$w[n]$ – віконна функція.

У частотній області це відповідає згортці спектра сигналу зі спектром віконної функції:

$$X_w(\omega) = X(\omega) \times W(\omega), \quad (1.13)$$

що призводить до розширення спектральних піків і появи паразитних складових.

Для зменшення спектрального розтікання застосовуються згладжувальні віконні функції (Ганна, Гемінга, Блекмана тощо) [63–65], які знижують рівень бічних пелюсток спектра. Разом з тим, використання віконних функцій супроводжується зменшенням ефективної амплітуди сигналу, що потребує додаткової нормалізації результатів спектрального аналізу.

Таким чином, результати спектрального аналізу суттєво залежать від вибору віконної функції та її параметрів, що ускладнює використання спектральних характеристик як єдиного критерію оцінки якості математичних моделей

1.3.1. Статистичні метрики оцінки точності та їх інтерпретація

Для формалізації результатів валідації чисельних моделей гідроакустичних полів широко застосовуються статистичні метрики, які дозволяють кількісно оцінити відхилення між модельними та експериментальними сигналами. Однією з найбільш поширених метрик є середньоквадратична похибка, яка використовується для оцінки енергії помилки відтворення сигналу та визначається як:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_{exp}[n] - x_{mod}[n])^2. \quad (1.14)$$

Для повернення до фізичних одиниць вимірювання використовується корінь середньоквадратичної похибки:

$$RMSE = \sqrt{MSE}. \quad (1.15)$$

Перевагою статистичних метрик є можливість автоматизованої обробки великої кількості даних та отримання числових показників, придатних для порівняння різних моделей. Разом з тим, статистичні метрики мають низку обмежень, пов'язаних із їх чутливістю до шумів, викидів та фазових зсувів між сигналами.

Особливістю середньоквадратичної похибки є її квадратична розмірність, що ускладнює фізичну інтерпретацію отриманих результатів. Для спрощення інтерпретації часто використовується корінь середньоквадратичної похибки, який повертає розмірність до одиниць акустичного тиску.

Фізичний опис поширення акустичних хвиль спирається на положення класичної лінійної акустики та механіки суцільного середовища.

У більшості робіт, присвячених валідації чисельних моделей, підсумковий висновок про якість моделі формується на підставі однієї або декількох метрик

похибки. Такий підхід є природним, оскільки кількісна оцінка точності дозволяє ранжувати конфігурації та обирати найкращу серед розглянутих. Однак для прикладних задач моделювання поширення акустичних хвиль цього недостатньо.

По-перше, низьке значення метрики ще не гарантує чисельної коректності постановки. Наприклад, певна конфігурація може випадково давати формально прийнятне значення похибки для конкретного фрагмента сигналу, хоча при цьому не виконується умова достатньої просторової роздільної здатності, порушуються вимоги стійкості або корисна складова в спектрі виражена слабо. За таких умов мала похибка не є свідченням якісної моделі, а може бути результатом випадкового збігу або неадекватного способу порівняння.

По-друге, оцінка лише за точністю ігнорує обчислювальну вартість. Для часових чисельних розв'язувачів збільшення точності зазвичай досягається через зменшення кроку сітки, збільшення кількості вузлів на довжину хвилі, зростання числа часових кроків та більш консервативні налаштування поглинаючих шарів. Усе це призводить до різкого збільшення часу моделювання та вимог до пам'яті. З погляду практичної експлуатації програмно-апаратного комплексу така конфігурація може бути неприйнятною, незважаючи на високу точність.

По-третє, метрика точності не завжди відображає стабільність результату. Дві конфігурації можуть мати близькі значення похибки для одного сценарію, але по-різному поводитися при невеликій зміні параметрів, частоти, часового вікна або умов середовища. Звідси виникає потреба в аналізі не тільки точкового значення метрики, а й стійкості конфігурації в околі обраних параметрів.

По-четверте, залежність лише від одного числового критерію ускладнює інтерпретацію. Наприклад, MSE є чутливою до великих відхилень, але не завжди зручно інтерпретується у відносних величинах [66]. NMAE забезпечує більш інтуїтивне уявлення про середнє відносне відхилення, однак теж не відображає причин невідповідності [67]. Відтак метрика повинна розглядатися як необхідний, але не єдиний елемент оцінювання.

Отже, у прикладній задачі валідації доцільно переходити від питання «яка конфігурація має найменшу похибку?» до питання «які конфігурації є

допустимими за сукупністю вимог?». Саме така постановка відповідає потребам програмної інженерії, де важливими є не лише теоретично найкращі результати, а й відтворюваність, інтерпретованість та практична придатність рішення.

1.3.2. Необхідність автоматизованого визначення допустимих параметрів моделі

З урахуванням обмежень підходів, що оцінюють якість моделі переважно за показниками точності, доцільним є перехід від «вибору найкращої моделі» до задачі автоматизованого визначення параметрів та області їх допустимих значень, у межах якої чисельне моделювання одночасно є чисельно коректним, ресурсно здійсненним та достатньо точним за заданими метриками узгодженості з експериментальними даними.

Параметри дискретної постановки (насамперед просторовий крок сітки, часовий крок, параметри поглинаючих шарів/граничних умов тощо) визначають не лише рівень похибки дискретизації, але й можливість виконання розрахунку в принципі. Частина конфігурацій може порушувати умови стійкості та коректності чисельної схеми (наприклад, обмеження на крок часу), внаслідок чого результат моделювання стає нефізичним або нестійким. Інша частина може бути коректною з точки зору чисельного методу, але вимагати надмірних витрат часу чи пам'яті через надто дрібну дискретизацію або надмірні розміри обчислювальної області. Тому задача валідації на практиці має враховувати не тільки ступінь збігу з експериментом, а й чисельні та ресурсні обмеження, що визначають межі застосовності моделі.

У прикладних сценаріях валідації, особливо коли необхідно виконувати серії прогонів для різних умов, конфігурацій джерела/приймача чи параметрів середовища, ручний підбір параметрів стає недостатньо надійним. Він, як правило, ґрунтується на евристиках та експертних припущеннях, є трудомістким і погано відтворюваним: різні дослідники можуть обирати різні кроки дискретизації та налаштування, отримуючи відмінні значення похибок і ресурсних витрат навіть для

однакової постановки. Це ускладнює порівняння результатів, повторюваність експериментів і формування обґрунтованих висновків щодо придатності моделі.

Саме тому виникає потреба у формалізованій процедурі, яка розглядає параметри моделі як простір конфігурацій і виконує відбір допустимих не “за одним показником”, а за послідовністю критеріїв, що відображають практичні вимоги до моделювання. Такий підхід дозволяє:

- відсікати некоректні конфігурації ще до етапу оцінки точності (тобто ті, що порушують умови коректності/стійкості);

- відсікати ресурсно неприйнятні конфігурації, які теоретично можуть бути точними, але не можуть бути використані через перевищення лімітів часу виконання або пам’яті;

- виконувати оцінку точності лише для конфігурацій, що пройшли попередні фільтри, і приймати ті, які задовольняють порогову вимогу за метрикою узгодженості з експериментом;

- за потреби застосовувати перевірку самоузгодженості, порівнюючи результати кандидатної конфігурації з контрольним розрахунком підвищеної чисельної точності, щоб уникнути прийняття конфігурацій, які “випадково” дають прийнятну метрику, але не демонструють узгодженої збіжності.

У підсумку автоматизоване визначення допустимих параметрів забезпечує не просто вибір одиничного набору налаштувань, а формування області допустимих конфігурацій, у межах якої модель придатна для практичного використання: вона коректно рахується, вкладається в задані ресурсні обмеження та відтворює експеримент з необхідною точністю. Саме така постановка є найбільш практичною для задач валідації гідроакустичних моделей, де необхідна повторюваність, масштабованість серійних прогонів і обґрунтоване визначення меж застосовності дискретної математичної моделі.

1.3.3. Вплив обчислювальних ресурсів на придатність чисельної моделі до практичного використання

У класичних дослідженнях чисельного моделювання увага часто зосереджується на питаннях точності, збіжності та фізичної адекватності результату. Однак для практичного використання математичної моделі у складі програмно-апаратного комплексу цього недостатньо. Не менш важливим є питання ресурсної придатності моделі, тобто її здатності забезпечити прийнятний результат за допустимих витрат часу обчислення, оперативної пам'яті та інших обчислювальних ресурсів.

Для задач моделювання розповсюдження акустичних хвиль ресурсна складова є особливо суттєвою. Збільшення точності чисельної постановки зазвичай досягається за рахунок зменшення кроку просторової сітки, скорочення часового кроку, збільшення розміру обчислювальної області та ускладнення граничних умов. Кожне з цих рішень призводить до зростання кількості обчислювальних операцій і збільшення обсягу проміжних даних. У результаті конфігурація, яка демонструє високу точність на окремому тесті, може виявитися непридатною для багаторазового запуску, параметричного аналізу або використання в умовах обмеженого апаратного забезпечення.

У зв'язку з цим оцінювання моделі повинно враховувати не лише її точність, а й ресурсну ефективність. З погляду програмної інженерії це означає, що модель має бути не просто «правильною», а практично експлуатованою. Для серійних розрахунків, тестування множини конфігурацій, аналізу сценаріїв або інтеграції в програмно-апаратний комплекс час виконання стає одним із визначальних критеріїв якості рішення.

Особливої уваги заслуговує те, що залежність між точністю і витратами ресурсів, як правило, не є лінійною. Невелике підвищення просторової роздільної здатності може спричинити істотне зростання часу обчислення через збільшення кількості вузлів сітки та числа часових кроків. Таким чином, у певний момент додаткове підвищення точності перестає бути виправданим з погляду практичного використання. Це означає, що оптимальна конфігурація моделі повинна

визначатися не за мінімумом похибки як такого, а за компромісом між точністю та ресурсними витратами.

Ще одна важлива обставина полягає в тому, що ресурсні обмеження часто мають не абстрактний, а цілком конкретний характер. У реальній системі можуть бути задані граничний допустимий час розрахунку, обмеження обсягу оперативної пам'яті або вимоги до кількості експериментів, які мають бути виконані за фіксований проміжок часу. У таких умовах навіть фізично коректна й точна модель не може бути визнана придатною, якщо вона не вкладається у встановлені експлуатаційні рамки.

Тому ресурсна здійсненність має розглядатися як один із базових критеріїв допустимості конфігурації моделі. Це особливо важливо для автоматизованих систем валідації, де аналізується не одна конфігурація, а цілий параметричний простір можливих налаштувань. У такому випадку перевірка ресурсної придатності дозволяє відразу виключити завідомо неприйнятні варіанти й зосередити подальше точне оцінювання лише на тих рішеннях, які мають практичну перспективу застосування.

Отже, вплив обчислювальних ресурсів на придатність чисельної моделі повинен розглядатися як невід'ємна частина процедури валідації. Ігнорування цього фактора призводить до ситуації, коли модель оцінюється формально коректно, але виявляється малоцінною з точки зору реального використання. Навпаки, врахування ресурсних критеріїв дозволяє перейти до більш реалістичної постановки задачі, у якій якість моделі визначається не лише точністю відтворення фізичного процесу, а й можливістю ефективної реалізації цього відтворення у межах доступної обчислювальної інфраструктури.

1.3.4. Постановка задачі спектрально-статистичної валідації моделі та відбору її параметричних конфігурацій

Проведений аналіз показує, що сучасні підходи до валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль мають низку суттєвих обмежень.

Частина з них орієнтована переважно на якісний або напівформальний аналіз. Інша частина використовує кількісні метрики, однак не забезпечує належного узгодження сигналів перед порівнянням. Окремі підходи демонструють високу точність оцінювання, але не враховують ресурсні обмеження та практичну придатність конфігурації моделі. У результаті відсутній цілісний методичний і програмний підхід, який дозволяв би розглядати валідацію як відтворювану багатокритеріальну процедуру.

Звідси випливає наукова задача, що постає у межах даного дослідження. Необхідно розробити методи та програмні засоби валідації дискретних математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль, які забезпечували б коректне узгодження результатів чисельного моделювання з натурними вимірюваннями, кількісне оцінювання ступеня їх узгодженості на основі фізично змістовних ознак і формалізований відбір конфігурацій моделі з урахуванням не лише точності, а й чисельної коректності та ресурсної здійсненності.

Складність цієї задачі зумовлена тим, що вона поєднує декілька різнорідних аспектів. З одного боку, потрібно врахувати особливості цифрової обробки сигналів, зокрема ресемплінг, фільтрацію, спектральне представлення та вибір метрик. З іншого боку, слід урахувати обмеження чисельного моделювання: стійкість, дискретизацію, коректність параметрів і залежність результату від конфігурації розрахунку. Отож, необхідно реалізувати ці процедури у вигляді програмного засобу, придатного до автоматизованого багаторазового використання.

Саме тому доцільним є перехід від розгляду валідації як разового аналітичного етапу до її трактування як формалізованого програмно-алгоритмічного процесу. У межах такого підходу валідація включає кілька взаємопов'язаних рівнів: підготовку і узгодження вхідних даних, виділення інформативних ознак, обчислення метрик узгодженості, перевірку коректності конфігурації та відбір допустимих рішень у параметричному просторі. Лише поєднання цих рівнів дає змогу отримати результат, який є одночасно фізично змістовним, математично обґрунтованим і практично придатним.

Таким чином, напрям даного дослідження обґрунтовується необхідністю усунення виявлених недоліків існуючих підходів і створення інтегрованої методичної основи для валідації дискретних математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль у складі спеціалізованих програмно-апаратних комплексів.

Висновки до Розділу 1

У першому розділі дисертаційної роботи виконано аналіз сучасних підходів до валідації чисельних моделей гідроакустичних полів, що застосовуються для дослідження процесів розповсюдження акустичних хвиль у водному середовищі. Узагальнено основні проблеми, пов'язані з практичним використанням чисельного моделювання, та визначено обмеження існуючих підходів до зіставлення результатів моделювання з даними натурних вимірювань.

Показано, що однією з ключових проблем валідації є несумісність модельних і експериментальних сигналів за частотою дискретизації, зумовлена різною природою формування даних (апаратно фіксована частота реєстрації у натурних вимірюваннях і частота, що визначається параметрами дискретизації у моделі). Без попереднього узгодження часових рядів пряме порівняння сигналів у часовій області є математично некоректним і може призводити до хибних висновків щодо точності моделі.

Проаналізовано підходи до узгодження сигналів, зокрема ресемплінг із застосуванням інтерполяції та децимації, а також необхідність антиаліасингової фільтрації для запобігання спектральним спотворенням. Встановлено, що коректне узгодження дискретизації є обов'язковою передумовою подальшого застосування спектральних і статистичних методів порівняння та забезпечення відтворюваності результатів валідації.

Розглянуто спектральні та статистичні методи оцінювання узгодженості, зокрема аналіз у частотній області з використанням швидкого перетворення Фур'є та застосування статистичних метрик. Показано, що ці методи забезпечують

кількісне оцінювання відповідності результатів моделювання експериментальним даним, однак їх результати суттєво залежать від коректності етапу підготовки сигналів (узгодження частот дискретизації, вибір параметрів віконної обробки, запобігання аліасингу) та можуть бути чутливими до шумів і фазових зсувів, що обґрунтовує необхідність стандартизованої процедури підготовки даних.

Встановлено, що оцінювання моделі лише за точністю є недостатнім для практичних задач, оскільки не враховує чисельну коректність дискретної постановки та ресурсну здійсненність моделювання (витрати часу виконання та/або пам'яті). Підвищення точності за рахунок уточнення дискретизації або ускладнення постановки часто призводить до зростання обчислювальних витрат і може робити конфігурацію непридатною для серійних прогонів, особливо в умовах обмежених ресурсів.

За результатами проведеного аналізу обґрунтовано доцільність переходу до формалізованої задачі автоматизованого визначення параметрів та області їх допустимих значень для дискретної моделі. Така задача має розв'язуватися шляхом послідовного відбору конфігурацій за критеріями чисельної коректності, ресурсних обмежень та порогової точності (за необхідності — із перевіркою самоузгодженості відносно контрольного розрахунку підвищеної точності). Це визначає напрям подальших досліджень, представлений у наступних розділах дисертаційної роботи.

Таким чином, проведений аналіз обґрунтовує необхідність створення методу валідації чисельних моделей поширення гідроакустичних хвиль з узгодженням частот дискретизації та спектральним оцінюванням, а також методу вибору параметрів моделі за критеріями точності, чисельної коректності та ресурсної здійсненності.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ВАЛІДАЦІЇ ТА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

Розроблено метод валідації математичних моделей гідроакустичних полів, який забезпечує коректне порівняння результатів чисельного моделювання з даними натурних вимірювань за рахунок стандартизованої підготовки сигналів, узгодження частот дискретизації та виділення інформативної складової в частотній області. Метод реалізовано як послідовність процедур, що формують порівнювані ознаки сигналів і дозволяють отримати кількісну оцінку узгодженості моделі з експериментальними даними за вибраною статистичною метрикою.

Отримані результати валідації використовуються як вхідні дані для методу автоматизованого визначення параметрів для дискретної моделі поширення акустичних хвиль. Задача формалізується як процедура послідовного відбору конфігурацій параметрів за критеріями чисельної коректності, ресурсної здійсненності та порогової точності, із можливістю додаткової перевірки самоузгодженості відносно контрольного розрахунку підвищеної чисельної точності.

Результатом застосування методу є множина конфігурацій параметрів, придатних для практичної валідації математичних моделей за натурними даними в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

2.1. Постановка завдання валідації математичних моделей гідроакустичних полів

Задача валідації математичних моделей гідроакустичних полів полягає у кількісному зіставленні результатів чисельного моделювання з даними натурних гідроакустичних вимірювань з урахуванням особливостей формування сигналів у експерименті та в моделі. У загальному випадку на вхід подаються два часові ряди:

експериментальний сигнал, зареєстрований вимірювальною системою, та модельний сигнал, отриманий у процесі чисельного розрахунку.

Ключова практична складність полягає в тому, що експериментальні та модельні дані, як правило, мають різні частоти дискретизації, а отже — різну кількість відліків на одиницю часу. Це робить пряме порівняння у часовій області некоректним і може призводити до спотворення оцінки точності навіть за видимої схожості сигналів. Додатково на результат валідації впливають широкосмугові завади, спектральне “розтікання” при FFT та можливі фазові інверсії модельного сигналу.

Тому завдання валідації розглядається як алгоритмічний процес, що включає: 1) підготовку та узгодження дискретизації сигналів, 2) формування спектральних представлень із віконною обробкою та виділення інформативної складової, 3) перевірки коректності налаштувань дискретної моделі, 4) обчислення статистичних показників узгодженості на узгоджених даних. Виходом процесу є числова оцінка узгодженості результатів моделювання з натурними даними за вибраною метрикою.

Для формалізації процедури підготовки та зіставлення модельних і натурних сигналів розроблено алгоритм узгодження частот дискретизації, спектральної обробки та подальшого розрахунку метрик точності. Основна мета алгоритму полягає в тому, щоб привести сигнали до зіставного вигляду, виділити інформативну амплітудну складову та виконати контроль коректності даних перед оцінюванням узгодженості моделі. Узагальнену діаграму діяльності алгоритму наведено на рисунку 2.1.

Як видно з рисунку 2.1, вхідними даними алгоритму є часовий сигнал, початкова частота дискретизації F_s та параметр F_{inp} , який визначає умови подальшого узгодження частот. На першому етапі виконується розрахунок вихідної частоти F_{out} , до якої мають бути приведені дані для подальшого спектрального аналізу та порівняння.

Після визначення F_{out} перевіряється кратність співвідношення між початковою та цільовою частотами дискретизації. Якщо співвідношення є кратним,

застосовується децимація, тобто зменшення частоти дискретизації шляхом проріджування відліків сигналу. Якщо кратність не виконується, використовується дробовий ресемплінг, який дозволяє привести сигнал до необхідної частоти дискретизації у випадку нецілочисельного співвідношення частот.

Після узгодження частоти дискретизації виконується фільтрація сигналу та швидке перетворення Фур'є. Фільтрація використовується для зменшення впливу небажаних частотних складових і запобігання спотворенням під час зміни частоти дискретизації. Перетворення Фур'є забезпечує перехід від часового представлення сигналу до частотного, що дає змогу виділити інформативну складову на заданій частоті.

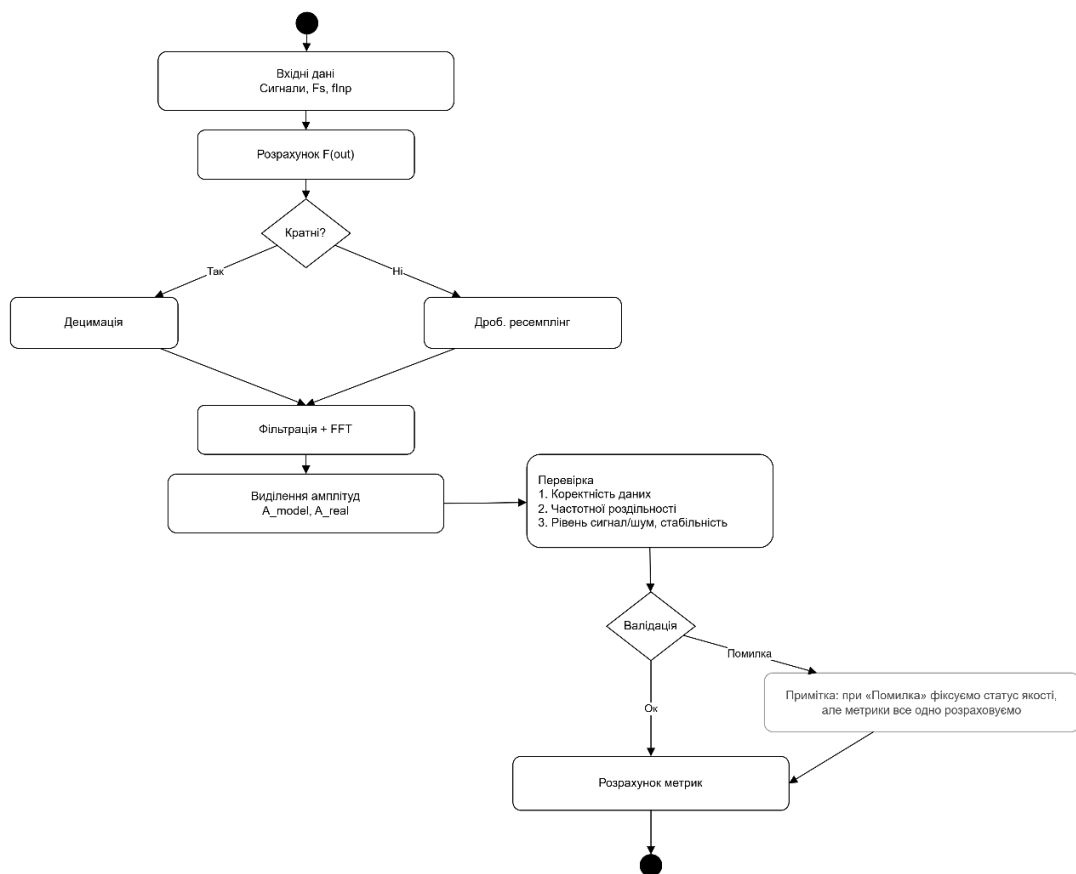


Рисунок 2.1 – Діаграма діяльності методу валідації математичних моделей гідроакустичних полів

Наступним етапом є виділення амплітудних характеристик модельного та натурного сигналів, зокрема A_{model} і A_{real} . Саме ці амплітудні значення використовуються для подальшого порівняння результатів моделювання з даними натурних вимірювань. Перед розрахунком метрик виконується перевірка

коректності даних, достатності роздільної здатності, рівня сигналу/шуму та стабільності отриманих характеристик.

На етапі валідації система визначає, чи задовольняють підготовлені дані встановленим умовам коректності. Якщо перевірка проходить успішно, виконується розрахунок метрик точності. Якщо виявлено помилку або невідповідність, система фіксує відповідний статус якості, однак розрахунок метрик усе одно може бути виконаний для подальшого аналізу. Такий підхід дозволяє не лише отримати числову оцінку узгодженості модельних і натурних даних, а й зберегти інформацію про надійність отриманого результату.

2.2. Алгоритм підготовки та узгодження експериментальних і модельних даних

Алгоритм підготовки та узгодження даних є базовим етапом запропонованого методу валідації математичних моделей гідроакустичних полів. Саме на цьому етапі усуваються відмінності у форматі подання даних, які виникають унаслідок різної природи експериментальних вимірювань та чисельного моделювання. Коректність реалізації цього етапу безпосередньо впливає на достовірність подальшої спектральної та статистичної оцінки якості моделей.

Вхідними даними алгоритму є експериментальний та модельний сигнали, які, як правило, мають різну частоту дискретизації, різну тривалість та різний масштаб амплітуд. Без спеціальної попередньої обробки такі сигнали не можуть бути використані для кількісного порівняння.

Визначення параметрів узгодження даних

Першим кроком визначається цільова частота дискретизації F_{out} , яка вибирається так, щоб бути узгодженою з корисною частотою сигналу (частотою випромінювача) і водночас забезпечувати ефективне застосування FFT. Використовується ітераційна процедура:

$$F_{out} = 1 \text{ Гц},$$

$$\text{поки } F_{out} < F_S, F_{out} = F_{out} \times 2,$$

де F_S – частота випромінювача.

Окрім вибору F_{out} , фіксується довжина аналізованого фрагмента N (як правило, зі степеневою структурою для FFT) та інтервал даних, який підлягає аналізу. Це дозволяє уніфікувати подальші кроки перетворення та порівняння.

Ресемплінг експериментальних і модельних сигналів

Після визначення F_{out} виконується приведення кожного вхідного сигналу з початковою частотою дискретизації F_{inp} до цільової.

Якщо частоти кратні:

$$F_{inp} \% F_{out} = 0, \quad (2.1)$$

то достатньо цілочисельної децимації з коефіцієнтом:

$$m = \frac{F_{inp}}{F_{out}}. \quad (2.2)$$

У цьому випадку вихідний сигнал формується просто вибіркою:

$$Out[i] = Inp[i \times m]. \quad (2.3)$$

Перевага такого режиму — мінімальна обчислювальна складність і відсутність додаткових інтерполяційних спотворень, але він можливий лише за кратності частот.

Якщо частоти не кратні:

$$F_{inp} \% F_{out} \neq 0, \quad (2.4)$$

то застосовується дробовий ресемплінг через підбір коефіцієнтів інтерполяції та децимації $interp$ і $decim$, таких що:

$$F_{inp} \times \frac{interp}{decim} = F_{out}. \quad (2.5)$$

Цей підхід важливий для практичної валідації, оскільки дозволяє узгоджувати сигнали у випадках, коли частота вимірювального обладнання і модельна частота дискретизації мають довільне співвідношення [96, 97]. Фактично це забезпечує приведення даних до єдиного часово-частотного формату для подальшого аналізу.

Фільтрація при зміні частоти дискретизації

Під час зменшення частоти дискретизації виникає ризик аліасингу: високочастотні складові “віддзеркалюються” у нижню частину спектра і спотворюють корисну компоненту. Це особливо критично у задачах, де подальша оцінка ґрунтується на амплітуді в частотній області.

Тому перед децимацією виконується антиаліасингова FIR-фільтрація. Для зменшення обчислювальних витрат фільтрація поєднується з процедурою вибірки — обчислення виконуються тільки для тих точок, що потрапляють у вихідний масив:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} h[k] \times X_L[n \times m - k], \quad (2.7)$$

де $h[k]$ — коефіцієнти FIR-фільтра,

N — довжина фільтра,

X_L — інтерпольований сигнал,

m — коефіцієнт децимації.

Така організація зменшує кількість операцій при повторному застосуванні алгоритму на серіях даних.

У межах запропонованого методу фільтрація реалізується у поєднанні з процедурою вибірки, що дозволяє зменшити кількість обчислювальних операцій. Це є важливим з огляду на необхідність багаторазового застосування алгоритму при аналізі серій експериментів.

Подальший алгоритм дій проводиться в декілька етапів.

Нормалізація амплітуд сигналів.

Після узгодження дискретизації експериментальний і модельний сигнали можуть мати різний масштаб амплітуди через відмінності умов реєстрації, чутливості тракту вимірювань або масштабування модельного виходу. Щоб метрика узгодженості відображала саме форму/структуру корисної складової, а не абсолютний рівень, застосовується нормалізація з приведенням даних до безрозмірного діапазону $[0; 1]$. Це дозволяє порівнювати сигнали за однаковою

шкалою і уникати домінування метрики через “масштаб”, не пов’язаний із якістю відтворення процесу.

Контроль корисної складової та фазової узгодженості.

Навіть після узгодження частоти дискретизації можливі випадки, коли сигнал не містить вираженої корисної складової на частоті випромінювача, наприклад через домінування шуму або некоректні налаштування моделі. Тому до подальших етапів допускаються лише ті випадки, для яких корисна складова на цільовій частоті виявляється та може бути надійно оцінена.

Окремо виконується контроль фазової узгодженості сигналів. Для цього обчислюється індикатор фазової узгодженості PhP , який характеризує знак фазової відповідності між досліджуваним та еталонним сигналами на частоті випромінювача та визначається як косинус різниці фаз досліджуваного та еталонного сигналів на частоті випромінювача:

$$PhP = \cos(\varphi_x(f_0) - \varphi_{ref}(f_0)), \quad (2.8)$$

де $\varphi_x(f_0)$ – фаза досліджуваного сигналу на частоті випромінювача f_0 ,

$\varphi_{ref}(f_0)$ – фаза еталонного сигналу на тій самій частоті.

Якщо $PhP < 0$, це інтерпретується як фазова інверсія хвилі відносно еталонного випадку. Така ситуація є принципово важливою: навіть за близьких амплітуд фізичний зміст результату не відповідає очікуваному, тому така конфігурація не повинна вважатися валідною для подальшого порівняння.

Формування узгоджених вибірок.

На завершальному кроці формуються узгоджені фрагменти сигналів однакової довжини N та з однаковою частотою дискретизації F_{out} . Саме ці вибірки використовуються на наступних етапах для застосування однакового типу вікна, однакових параметрів FFT та коректного виділення амплітуди на корисній частоті.

Узагальнена формалізація алгоритму.

Результатом алгоритму підготовки та узгодження експериментальних і модельних даних є пара підготовлених сигналів, для яких:

— усунено несумісність за частотою дискретизації;

- зменшено ризик аліасингу при ресемплінгу;
- забезпечено нормалізовану шкалу амплітуд;
- виконано контроль наявності корисної складової та відсутності фазової інверсії;
- зафіксовано параметри спектральної обробки, необхідні для відтворюваного аналізу.

Це створює коректну основу для формування спектральних ознак та статистичних метрик узгодженості.

2.3. Спектральна та статистична оцінка точності математичних моделей

У задачах акустичного аналізу спектральні та статистичні ознаки сигналу розглядаються як інформативні характеристики процесу поширення хвилі [68]. Після узгодження дискретизації та підготовки сигналів виконується кількісна оцінка узгодженості моделі з експериментальними даними. Основна ідея цього етапу – перейти від “сирого” часового порівняння до частотного представлення, де корисна інформація може бути виділена більш стабільно, а вплив широкосмугових завад зменшується.

З огляду на те, що у практичних вимірюваннях шум і паразитні частотні компоненти можуть істотно впливати на метрики у часовій області, оцінка орієнтується на амплітудну характеристику корисного сигналу на частоті випромінювача.

2.3.1. Формування спектральних представлень сигналів

Першим кроком є перехід до спектральних характеристик узгоджених сигналів. Для цього перед спектральним перетворенням застосовується віконна обробка:

$$y_w[n] = y_m[n] \times w[n], \quad (2.9)$$

де $y_m[n]$ – підготовлений сигнал (після ресемплінгу/фільтрації/нормалізації),

$w[n]$ – віконна функція.

У реальних задачах аналіз виконується не для нескінченного сигналу, а для обмеженого фрагмента довжини N . Таке “обрізання” еквівалентне множенню сигналу на прямокутне вікно, що в частотній області викликає спектральне розтікання: енергія корисної гармоніки “розмазується” на сусідні частоти. Це погіршує стабільність оцінки амплітуди на потрібній частоті, особливо якщо частота випромінювача не потрапляє точно в центр частотного відліку або якщо присутній шум. Віконна функція зменшує різкі розриви на межах фрагмента і тим самим зменшує розтікання та паразитні складові спектра.

Для зменшення розтікання використовується вікно Блекмана, яке визначається як:

$$w[n] = 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0.8 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right). \quad (2.10)$$

Це вікно належить до класу вікон з “м’якими” краями та забезпечує суттєве пригнічення бічних пелюсток спектра (тобто паразитних складових, що виникають через скінченність вибірки). Для задач валідації це важливо, оскільки порівнюються не просто спектри, а значення амплітуди корисної складової: зменшення бічних пелюсток означає менший вплив шумових та сторонніх компонент на оцінку амплітуди саме в околі корисної частоти. Компромісом є деяке розширення головної пелюстки (тобто зниження частотної гостроти), але в даній задачі це прийнятно, оскільки фокус робиться на стабільності оцінки амплітуди корисного сигналу, а не на надтонкій частотній роздільній здатності.

Далі формується спектральне представлення:

$$X(f) = \sum_{n=0}^{N-1} y_m[n] e^{-j2\pi f n/N}. \quad (2.11)$$

У процедурі валідації важливо, щоб усі параметри спектрального аналізу (довжина фрагмента N , тип вікна, спосіб формування спектра) застосовувалися однаково і до експериментального, і до модельного сигналу. Це забезпечує порівнюваність результатів: різниця у спектральних оцінках тоді відображає саме відмінності моделі від експерименту, а не різні налаштування обробки.

2.3.2. Виділення амплітуди корисного сигналу

Спектральне представлення саме по собі містить інформацію про всі частотні компоненти, включно з шумом та паразитними складовими. Для задачі валідації доцільно виділяти корисну компоненту, яка має прямий фізичний зміст у постановці — компоненту на частоті випромінювача. Тому для подальшого порівняння використовується амплітуда на корисній частоті:

$$A(F'_s t) = |X(F'_s t)|. \quad (2.12)$$

Амплітуда є стійкішою до фазових зсувів, які можуть виникати через особливості реєстрації або граничні умови моделювання. У той же час вона напряму характеризує рівень сигналу на інформативній частоті, що важливо для оцінювання того, наскільки модель відтворює енергетичні/амплітудні характеристики акустичного поля. Використання модуля $|\cdot|$ забезпечує однозначне невід'ємне представлення амплітуди, яке зручно порівнювати для експерименту та моделі.

Практично цей крок також виконує функцію “фільтрації за змістом”: замість того, щоб порівнювати весь спектр (де є багато неінформативних компонент), зосереджуються на частоті, що несе корисну інформацію про випромінювання і поширення хвилі.

2.3.3. Статистичні метрики узгодженості

Після виділення амплітудних характеристик формується кількісна оцінка узгодженості експерименту та моделі. Порівняння виконується на амплітудних рядах (для експерименту та моделі), отриманих в однакових умовах обробки.

Для оцінювання використовуються:

1. Абсолютне відхилення:

$$\Delta E = A_{real} - A_{model}. \quad (2.13)$$

Цей показник зручний для інтерпретації як “різниця рівнів” у безрозмірному (нормованому) представленні. Він показує напрям відхилення: чи модель недооцінює або переоцінює амплітуду.

2. Відносний коефіцієнт:

$$K = \frac{A_{real}}{A_{model}}. \quad (2.14)$$

Цей показник дає масштабну інтерпретацію: у скільки разів модель відрізняється від експерименту. Він корисний, коли важлива саме відносна похибка або коли абсолютні значення можуть змінюватися між експериментами.

3. Середньоквадратична похибка:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y[n] - \hat{y}[n])^2. \quad (2.15)$$

У межах цього етапу $y[n]$ та $\hat{y}[n]$ інтерпретуються як порівнювані ряди (після узгодження дискретизації та виділення інформативної амплітудної складової). MSE узагальнює розбіжності по всій вибірці й дозволяє отримати одну числову характеристику “енергії відхилень”. Вона є зручною для порівняння серій прогонів, оскільки агрегує локальні відмінності у стабільний скалярний показник.

Важливо, що метрики застосовуються після приведення даних до порівнюваного вигляду та нормалізації, тому вони відображають саме якість відтворення корисної складової сигналу, а не відмінності, зумовлені різною дискретизацією або масштабом амплітуд.

2.3.4. Перевірки чисельної коректності дискретної постановки

Оцінка узгодженості має сенс лише тоді, коли модельні результати є чисельно коректними. Інакше метрика може порівнювати не фізичний процес, а артефакт нестійкого або надто грубого чисельного розрахунку. Тому до інтерпретації результатів валідації включається контроль умов дискретизації.

Довжина хвилі визначається як:

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (2.16)$$

Далі перевіряється достатність просторової дискретизації [69]:

$$\frac{\lambda}{\Delta x} \geq 6 \dots 10.$$

Ця вимога означає, що на одну довжину хвилі повинно припадати достатньо вузлів сітки; інакше виникають значні дисперсійні спотворення, “розмивання” фронту хвилі та викривлення амплітуди, що робить порівняння з експериментом некоректним.

Стійкість контролюється умовою CFL:

$$C = \Delta t \sum_{i=1}^n \frac{U_{xi}}{\Delta x_i} \leq C_{max}, \quad (2.17)$$

а для тривимірного випадку:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c \times \sqrt{3}}. \quad (2.18)$$

Ці перевірки забезпечують, що вибір кроку часу узгоджений із просторовою сіткою та швидкістю поширення хвилі, і чисельна схема не переходить у нестійкий режим [70–71]. Конфігурації, що не виконують ці умови, не повинні розглядатися як валідні для оцінювання метрик точності, оскільки вони потенційно породжують нефізичні значення амплітуди.

2.3.5. Інтерпретація результатів оцінки

Отримані метрики ΔE , K та MSE інтерпретуються як кількісні показники узгодженості моделі з натурними даними на інформативній частоті. Для коректної інтерпретації важливо, щоб виконувалися наступні умови:

1. Сигнали були узгоджені за дискретизацією (п. 2.2).
2. Спектральна оцінка виконувалась за однаковими параметрами (одне й те саме N , те саме вікно).
3. Були пройдені перевірки чисельної коректності (п. 2.3.4).
4. Була підтверджена наявність корисної складової на частоті випромінювача.

Тоді відмінності у метриках можна розглядати як наслідок відмінностей у фізичній адекватності моделі та її параметрів, а не як наслідок некоректної обробки даних або нестійкої чисельної схеми.

2.3.6. Місце етапу оцінки точності в загальній схемі методу

Сформовані на цьому етапі спектральні та статистичні показники узгодженості модельного та експериментального сигналів використовуються як формалізована кількісна оцінка точності для заданої постановки та обраних параметрів дискретизації. Важливо, що ці показники отримуються на узгоджених даних і з фіксованими параметрами обробки, що забезпечує відтворюваність результатів при порівнянні серій прогонів.

Отримані значення метрик не розглядаються як самоціль, оскільки в практичних задачах модель має бути не лише достатньо точною, а й чисельно коректною та ресурсно здійсненою [72]. Тому результати етапу 2.3 використовуються як критерій “точність” у подальшій процедурі вибору параметрів: з множини можливих конфігурацій відбираються ті, що 1) задовольняють умови чисельної коректності, 2) вкладаються у задані обмеження часу виконання та/або пам’яті, і 3) досягають порогового рівня узгодженості з експериментальними даними за визначеною метрикою.

Таким чином, етап спектральної та статистичної оцінки забезпечує кількісну основу для наступного підрозділу, де розглядається метод визначення області допустимих параметрів дискретної моделі за сукупністю критеріїв коректності, ресурсів і точності.

2.4. Метод визначення області допустимих параметрів дискретної моделі за критеріями коректності, ресурсів і точності

У задачах валідації дискретних математичних моделей поширення акустичних хвиль недостатньо орієнтуватися лише на мінімізацію похибки за

обраною метрикою. Підвищення чисельної роздільної здатності дискретизації (наприклад, зменшення кроку сітки або кроку часу, зміна параметрів поглинаючого шару) може одночасно покращувати узгодженість із натурними даними та призводити до порушення умов чисельної коректності або до неприйнятних обчислювальних витрат (час виконання, використання пам'яті). Тому доцільно визначати не єдину найкращу конфігурацію, а область параметрів, у межах якої модель є придатною для практичного застосування: чисельно коректною, ресурсно здійсненою та достатньо точною.

Модель розглядається у постановці *black-box*: внутрішня реалізація чисельного солвера не модифікується, а керування дослідженням здійснюється через серії прогонів із різними налаштуваннями параметрів. Параметричний простір задається дискретно як множина потенційних конфігурацій:

$$\Theta = \{\theta_l\}_{l=1}^L, \quad (2.19)$$

де θ_l – набір керованих параметрів чисельної постановки (наприклад, просторовий і часовий кроки Δx , Δt , параметри/товщина PML, правила вибору кроку за умовою стійкості, тип граничних умов тощо),

l – індекс конфігурації,

$L = |\Theta|$ – кількість конфігурацій.

Нехай φ – вектор параметрів сценарію/експерименту (геометрія акваторії, профілі середовища, частота/амплітуда джерела, відстань джерело–приймач тощо), які не оптимізуються в межах задачі підбору чисельних параметрів. Для фіксованого сценарію φ необхідно визначити область допустимих конфігурацій

$$\Omega(\varphi) \subseteq \Theta, \quad (2.20)$$

тобто множину таких θ , які задовольняють сукупність критеріїв коректності, ресурсів і точності.

Метод визначення $\Omega(\varphi)$ реалізується як послідовність процедур відсіву (каскад критеріїв), що застосовуються до конфігурацій Θ . Такий підхід забезпечує відтворюваність і інтерпретованість вибору параметрів: на кожному етапі можна чітко пояснити, чому певні конфігурації відкинуті, а інші залишені.

Алгоритм методу визначення області допустимих параметрів можна зобразити у вигляді діаграми діяльності (рисунк 2.2).

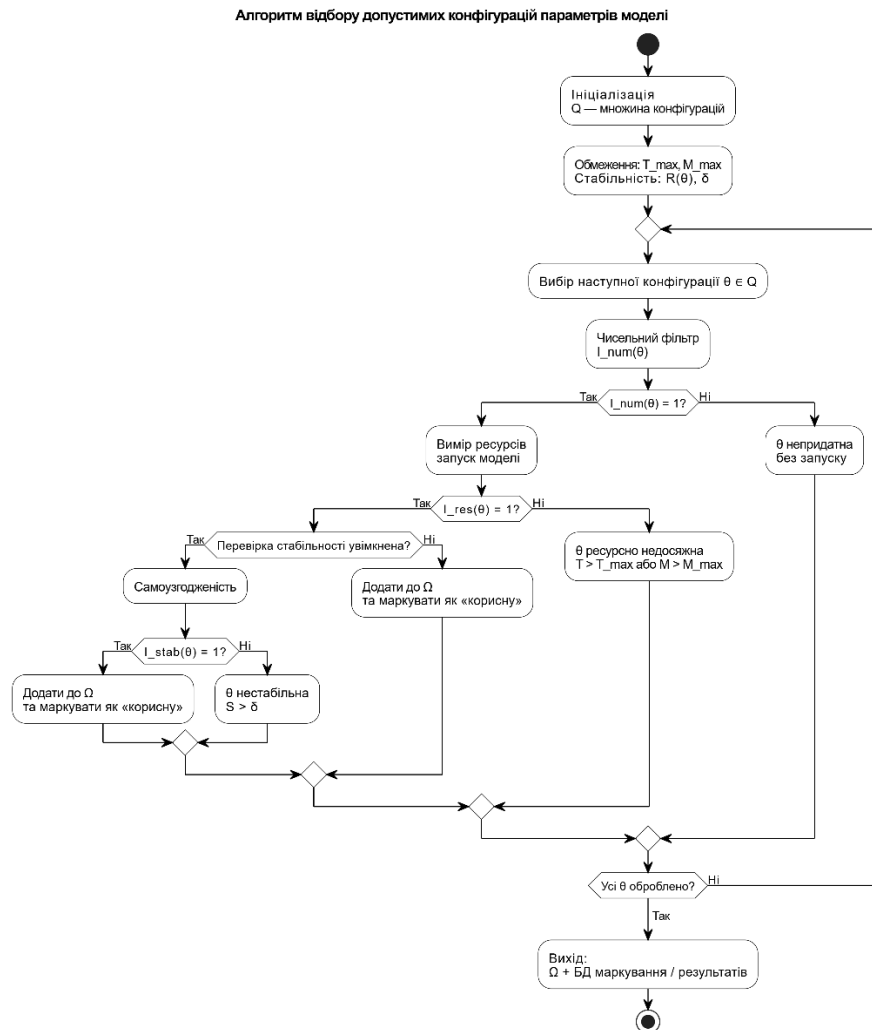


Рисунок 2.2 – Діаграма діяльності методу визначення області допустимих параметрів

Детальний опис алгоритму наведено у підрозділах нижче.

2.4.1. Априорний фільтр чисельної коректності

На першому етапі виключаються конфігурації, які є чисельно некоректними або потенційно призводять до нефізичних результатів. Йдеться про перевірки узгодженості часової та просторової дискретизації, виконання умов стійкості схеми, достатності дискретизації для заданого частотного діапазону та інші умови валідності обчислень.

Вводиться індикатор чисельної коректності:

$$I_{num}(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta \text{ задовольняє чисельні умови,} \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (2.21)$$

Конфігурації з $I_{num}(\theta) = 0$ відкидаються до запуску моделі, що зменшує кількість дорогих прогонів і запобігає потраплянню до аналізу завідомо некоректних результатів.

2.4.2. Фільтр ресурсної здійсненності

Для кожної конфігурації, що пройшла чисельний фільтр, виконується запуск *black-box* моделі та фіксуються обчислювальні ресурси:

- $T(\theta)$ – час виконання розрахунку (с);
- $Mem(\theta)$ – пікове споживання пам'яті (Мб).

Задаються допустимі ліміти платформи T_{max} та Mem_{max} . Вводиться індикатор програмно-апаратної здійсненності:

$$I_{num}(\theta) = \begin{cases} 1, & \theta \text{ задовольняє чисельні умови} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (2.22)$$

Таким чином відсіюються конфігурації, які можуть бути привабливими з точки зору точності, але не можуть бути використані на практиці через перевищення доступних ресурсів.

2.4.3. Фільтр достатньої точності за метрикою

Точність конфігурацій, які успішно подолали попередню фільтрацію, перевіряється шляхом їхнього порівняння з еталонними даними. Нехай множина контрольних просторових точок $R \subset \mathbb{R}^3$ задає положення приймачів у просторі, $r = (x, y, z)$. Для конкретного експерименту глибина може бути сталою $z = z_0$, однак метод не обмежується фіксованим значенням z .

Вважатимемо, що для обраної конфігурації $\theta \in \Theta$ модель генерує сигнал у вигляді:

$$y_{mod}(t, r, \theta), r \in R, t \in [0, T], \quad (2.23)$$

а еталонні дані задаються як $y_{ref}(t, r)$ (це можуть бути натурні вимірювання або референсний чисельний розрахунок). Тоді відхилення (похибку) можна обчислити таким чином:

$$e_{t,r,\theta} = y_{mod}(t, r, \theta) - y_{ref}(t, r). \quad (2.24)$$

Для комплексної оцінки точності доцільно застосовувати стандартні детерміністичні метрики (наприклад, MSE/MAE/нормовані похідні). У межах відсіву вводиться порогове значення δ_{MSE} та індикатор точності:

$$I_{acc}(\theta) = \begin{cases} 1, & MSE(\theta) \leq \delta_{MSE}, \\ 0, & MSE(\theta) > \delta_{MSE}. \end{cases} \quad (2.25)$$

Усі конфігурації, похибка яких перевищує встановлений ліміт, вважаються невалідними для даного сценарію φ та виключаються з подальшого аналізу.

2.4.4. Перевірка самоузгодженості

На практиці доцільно доповнювати відбір додатковим контролем стабільності результату при контрольній зміні постановки. Ідея полягає в тому, що коректна конфігурація θ має давати результат, який слабо змінюється при переході до контрольної конфігурації θ^+ з підвищеною чисельною точністю (наприклад, уточнена дискретизація $\Delta x/\Delta t$, альтернативні налаштування за збереження коректності, інші граничні умови за достатньо віддалених меж тощо). Пара (θ, θ^+) задається правилом побудови контрольного запуску.

Нехай з виходу моделі формується порівнювана ознака $A(\theta, r)$ у контрольних точках $r \in R$. Тоді міра самоузгодженості задається дискретною сумою:

$$E_{sc}(\theta) = \frac{1}{|R|} \sum_{r=1}^{|R|} (A(\theta, r) - A(\theta^+, r))^2. \quad (2.26)$$

Вводиться порогове значення δ та індикатор самоузгодженості:

$$I_{sc}(\theta) = \begin{cases} 1, & E_{sc}(\theta) \leq \delta, \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (2.27)$$

Цей крок застосовується як додатковий фільтр, коли необхідно відсіяти режими з високою варіативністю результату при контрольній зміні постановки.

2.4.5. Формування області допустимих параметрів

Після того як для кожної конфігурації $\theta \in \Theta$ обчислено індикатори проходження фільтрів (чисельна коректність, програмно-апаратна здійсненність, достатня точність і, за потреби, самоузгодженість), виконується формування області допустимих конфігурацій Ω . Сенс цього кроку полягає у тому, щоб перейти від розрізнених результатів окремих перевірок до чітко визначеної множини конфігурацій, які одночасно задовольняють усі необхідні вимоги.

Область допустимості визначається як множина тих θ , які задовольнили умови всіх обов'язкових фільтрів (включно з необов'язковим критерієм самоузгодженості, у разі його використання):

$$\Omega = \{\theta \in \Theta \mid I_{num}(\theta) = 1 \wedge I_{hw}(\theta) = 1 \wedge I_{acc}(\theta) = 1 \wedge (I_{sc}(\theta) = 1)\} \quad (2.28)$$

З практичної точки зору, запропонований метод діє як механізм послідовної фільтрації: кожна окрема конфігурація або остаточно зараховується до множини Ω , бо ж відбраковується на певному кроці. Такий підхід до організації процесу має суттєве значення з двох причин:

1. Відтворюваність: рішення “допустимо/недопустимо” для кожної θ визначається формалізованими правилами, а не експертними припущеннями.

2. Інтерпретованість: для будь-якої відкинутої конфігурації можна однозначно пояснити, чому вона відкинута (порушена коректність; перевищено ресурс; не досягнуто порогу точності; не пройдена самоузгодженість).

Для контролю результату і для подальшої аналітики (наприклад, для різних сценаріїв φ) доцільно фіксувати розмір області допустимості - кількість конфігурацій, що пройшли відбір:

$$|\Omega| = \sum_{\theta \in \Theta} \theta \in \Omega. \quad (2.29)$$

Цей показник зручний як узагальнена характеристика жорсткості обмежень: якщо $|\Omega|$ надто велике — критерії надто м'які; якщо $|\Omega| = 0$ — критерії/ліміти можуть бути надто строгими або Θ не покриває потрібні конфігурації.

Якщо застосовується самоузгодженість, окремо може бути виділена підобласть $\Omega_{sc} \subseteq \Omega$, яка додатково проходить контроль стабільності результату

при переході до θ^+ . Це корисно в ситуаціях, коли потрібно отримати не просто “прийнятну точність”, а ще й гарантувати, що результат не є випадковим/чутливим до контрольної зміни дискретизації.

2.4.6. Інтерпретація результатів та практичне використання області параметрів

Отримана множина Ω є результатом методу визначення допустимих параметрів для фіксованого сценарію φ . Її ключова інтерпретація така: будь-яка конфігурація $\theta \in \Omega$ є придатною для практичного застосування у задачі валідації, тому що:

- вона чисельно коректна (відсіяти конфігурації, що потенційно дають нефізичний/нестійкий результат);
- вона здійсненна на доступних ресурсах (не перевищує задані ліміти часу виконання та/або пам'яті);
- вона достатньо точна щодо еталонних даних за порогом метрики (і, за потреби, додатково є самоузгодженою).

Способи використання Ω на практиці:

1. Паспорт допустимих налаштувань для серійних прогонів. Валідація зазвичай передбачає багаторазові запуски розв'язувача (різні відстані, варіанти середовища, різні фрагменти запису тощо). Ω дозволяє одразу обмежити перебір конфігураціями, які не зірвуть обчислення і не вийдуть за ресурсні ліміти.

2. Основа для вибору робочої конфігурації під конкретні обмеження. У середині Ω можуть бути конфігурації з різними практичними профілями: одні ближчі до порогу по точності, але швидші; інші — мають запас по точності, але споживають більше часу/пам'яті. Важливо, що цей вибір здійснюється в межах допустимості, тобто між варіантами, які вже не порушують коректність і не виходять за обмеження.

3. Механізм протоколювання та аудиту прийнятих рішень. Для кожної θ доцільно зберігати: значення індикаторів I_{num}, I_{hw}, I_{acc} (та I_{sc} , якщо

застосовано), а також виміряні $T(\theta)$, $Met(\theta)$ і значення метрики точності. Це дозволяє:

- повторити експеримент;
- пояснити відкидання/прийняття конкретної конфігурації;
- порівнювати сценарії φ між собою (наприклад, як змінюється $|\Omega|$ при зміні середовища або частоти).

4. Інструмент контролю балансу обмежень без введення інтегральних індексів.

Метод не зводить різнорідні критерії в один показник. Замість цього Ω фіксує множину прийнятних рішень, а не єдине найкраще. Це знімає проблему суб'єктивного вибору ваг/нормалізацій і робить результат стійкішим методологічно: допустимість визначається порогами, а подальший вибір робочої конфігурації здійснюється в залежності від конкретних умов застосування.

Типові ситуації і як їх інтерпретувати:

— $|\Omega| = 0$: у поточному наборі Θ немає конфігурацій, які одночасно проходять усі пороги. Це сигнал, що потрібно переглянути: а) склад Θ (можливо, він не містить реалістичних варіантів), або б) ресурсні ліміти T_{max} , Met_{max} , або в) поріг точності (надто строгий для даного сценарію).

— $|\Omega|$ дуже велике: пороги можуть бути надто м'якими, і область допустимості виходить занадто широкою. У такому разі доцільно посилити поріг точності або додати/активувати перевірку самоузгодженості, якщо критичною є стабільність результатів.

2.4.7. Місце методу формування області параметрів у загальній структурі методу вибору параметрів моделі за критеріями точності та ресурсної здійсненності

Метод визначення Ω є логічним продовженням попередніх етапів, у яких експериментальні та модельні дані приводяться до порівнюваного вигляду і формується кількісна оцінка узгодженості. Власне, фільтр достатньої точності

використовує значення метрики, отриманої після процедур підготовки даних і спектрально-статистичної оцінки: це забезпечує, що рішення про прийнятність θ приймається на основі коректно підготовлених і зіставних даних.

Водночас критерій точності розглядається не ізольовано, а лише після виконання двох фундаментальних умов практичної придатності:

1. Спочатку відсіюються конфігурації, що не гарантують чисельну коректність.
2. Далі відсіюються конфігурації, що не вкладаються в апаратні обмеження.
3. І лише потім оцінюється точність щодо еталонних даних (а за потреби — підтверджується самоузгодженість).

Таким чином, у межах розділу 2 формується цілісна методика:

1. Підготовка та узгодження сигналів.
2. Формування метрик.
3. Каскадний відбір конфігурацій і формування Ω .

Результатом є область допустимих параметрів, яка слугує основою для практичних серійних експериментів, аналізу властивостей допустимості та демонстрації працездатності методу на реальних даних у наступному розділі.

Висновки до Розділу 2

У другому розділі дисертаційної роботи розроблено та формалізовано метод валідації математичних моделей гідроакустичних полів, який забезпечує коректне порівняння результатів чисельного моделювання з даними натурних вимірювань за рахунок стандартизованої підготовки сигналів та єдиних правил їх спектрально-статистичного аналізу.

Запропоновано алгоритм підготовки та узгодження експериментальних і модельних даних, який включає визначення цільової частоти дискретизації, приведення сигналів до єдиної частоти дискретизації (ресемплінг), антиаліасингову фільтрацію при зміні частоти дискретизації та амплітудну нормалізацію. Реалізація цього етапу забезпечує формування узгоджених вибірок,

придатних для подальшого спектрального аналізу та обчислення метрик узгодженості.

Розроблено процедуру спектральної та статистичної оцінки узгодженості моделі з експериментальними даними, яка базується на віконній обробці (вікно Блекмана), формуванні спектрального представлення та виділенні амплітуди корисної складової на частоті випромінювача.

На основі сформованих амплітудних характеристик обчислюються статистичні метрики узгодженості, що дозволяють кількісно оцінювати відхилення між модельним і експериментальним сигналами.

Сформовані метрики використано як критерій “точність” у методі визначення параметрів та області їх допустимих значень для дискретної моделі. Показано, що практична придатність конфігурації визначається не лише рівнем точності, а й виконанням умов чисельної коректності та ресурсної здійсненності. Запропоновано каскадний відбір конфігурацій параметрів, за результатами якого формується область допустимих конфігурацій Ω , що задовольняють критерії чисельної коректності, обмеження ресурсів і порогову точність (за потреби — з додатковою перевіркою самоузгодженості).

Отримані в другому розділі результати створюють методологічну основу для експериментальної перевірки ефективності запропонованого методу валідації та методу формування області допустимих параметрів, яка буде проведена у наступному розділі дисертаційної роботи.

А також результати другого розділу формують теоретичну та алгоритмічну базу для подальшої програмної реалізації методу, проведення обчислювальних експериментів і кількісного підтвердження досягнення компромісу між точністю моделі та витратами обчислювальних ресурсів.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МЕТОДІВ ВАЛІДАЦІЇ ТА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ

Проведено експериментальну перевірку методу вибору параметрів чисельної акустичної моделі поширення хвиль у водному середовищі за одночасними критеріями точності та обчислювальної вартості. Практична необхідність такої перевірки зумовлена тим, що в задачах моделювання в часовій області параметри дискретизації та параметри граничного поглинання істотно впливають як на узгодженість моделі з натурними даними, так і на час обчислень. Зменшення кроку сітки та посилення поглинального шару PML можуть покращувати чисельну коректність і зменшувати паразитні відбиття, але призводять до зростання розмірності задачі та, відповідно, до збільшення часу моделювання. Навпаки, груба дискретизація та недостатній PML здатні зменшити час, однак погіршують відповідність сигналів через чисельну дисперсію та відбиття на границях області. Саме тому у прикладних програмно-апаратних гідроакустичних комплексах доцільно не шукати єдину найточнішу конфігурацію, а визначати область допустимих конфігурацій (прийнятних за точністю), а вже в її межах обирати ресурсно-ефективні рішення. Такий підхід узгоджується з практикою розрахункової гідроакустики, де важливо оцінювати не лише якість результату, але й здійсненність обчислень в умовах обмежених ресурсів [73].

Експеримент реалізовано у вигляді серії прогонів чисельного розв'язувача у режимі «black-box», де внутрішній алгоритм не змінюється, а керування здійснюється через набір параметрів дискретної постановки (параметри просторової дискретизації, PML та розміри домену). Для кожної конфігурації параметрів протоколюються 1) метрика точності відносно натурального сигналу та 2) час виконання моделювання. Далі реалізується відбір конфігурацій за порогом точності та пошук найшвидшої конфігурації серед прийнятних. Усі обчислення

виконані в середовищі Jupyter Notebook, що забезпечує відтворюваність обчислювального експерименту та прозорість проміжних кроків [47].

3.1. Вихідні дані та програмна реалізація експериментальних досліджень

Коректний вибір натурних вимірювань, способу формування порівнюваних часових фрагментів і засобів чисельного відтворення акустичного поля є визначальним для забезпечення достовірності подальшої валідації математичної моделі. Саме тому окрему увагу приділено не лише джерелу експериментальних даних, а й процедурі їх підготовки до зіставлення з результатами моделювання.

Особливість проведених досліджень полягає в необхідності забезпечення відтворюваності кожного етапу обчислювального експерименту: від вибору конкретного фрагмента натурального запису до фіксації параметрів чисельної постановки та критеріїв оцінювання. У контексті задач моделювання гідроакустичних полів це має принципове значення, оскільки навіть незначні зміни параметрів середовища, геометрії сцени або часової прив'язки аналізованого сигналу можуть суттєво впливати на результати порівняння. Тому програмна реалізація експерименту орієнтована на однозначне задання конфігурації розрахунку, автоматизацію обробки вимірних даних і уніфікацію процедури оцінювання.

3.1.1. Натурні дані та вибір фрагмента для порівняння

Як джерело натурних вимірювань використано відкритий датасет SWellEx-96 (подія S5), який містить багатотонові гідроакустичні передачі та супровідні матеріали для відновлення параметрів постановки (зокрема, дальностей “джерело–приймач”) [74, 75]. Використання саме SWellEx-96 є методологічно виправданим у задачах експериментальної перевірки, оскільки: 1) дані є відкритими й доступними для незалежного відтворення; 2) записи містять реальні натурні ефекти (шум, багатопроменевість, змінність середовища [76, 77]), які важко коректно змодельовати синтетично; 3) наявні табличні дані дальності дають змогу

узгоджувати геометрію експерименту з чисельною постановкою без ручного введення.

У рамках експерименту використано дані вертикальної антенної решітки VLA (processed channels). Сценарій відтворення задається конкретним файлом хвилинного запису, номером каналу приймання, початковим зсувом у межах хвилини та тривалістю сегмента. Для демонстраційного прикладу використано канал 10 (0-based індексація) та $minute_file = 74$ із $OFFSET_IN_MINUTE_S = 0$. Формування сегмента виконується відтворювано: початок вікна однозначно задається як $t_{start} = 60 \cdot minute_file + OFFSET_IN_MINUTE_S$ (3.1), а довжина сегмента задається тривалістю аналізу. Для серійного перебору конфігурацій використано скорочене пошукове вікно 0,25 с, що істотно зменшує час одного запуску та дозволяє виконувати параметричний пошук у прийнятні строки. Важливо, що скорочення вікна не знижує порівнюваність конфігурацій, оскільки усі вони оцінюються на одному й тому самому фрагменті даних.

Для обраного сценарію сформовано вимірний сегмент гідроакустичного сигналу, який далі використовується як еталон для порівняння з результатами чисельного моделювання. Побудова виконана за даними SWellEx-96 (S5) і наведена на рисунку 3.1.

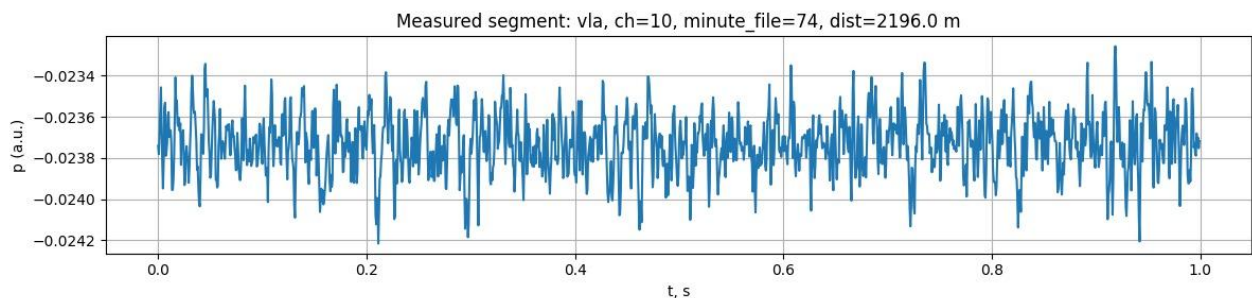


Рисунок 3.1 – Фрагмент виміряного сигналу тиску $p_{meas}(t)$ (VLA, канал 10, $minute_file=74$, $R = 2196\text{м}$)

Відстань “джерело–приймач” R визначалась автоматично за таблицею `range.tar`, що постачається разом із SWellEx-96. Значення R відновлюється шляхом інтерполяції табличних значень для відповідної хвилини експерименту; у цьому сценарії отримано $R = 2196\text{м}$. Автоматичне відновлення дальності усуває джерело

суб'єктивності (вибір/введення дальності вручну) та забезпечує повторюваність постановки при відтворенні експерименту іншими дослідниками.

3.1.2. Програмні засоби та бібліотеки

Програмна реалізація експерименту виконана у форматі Jupyter Notebook, що відповідає сучасній практиці відтворюваних обчислень у наукових дослідженнях: у одному документі зафіксовано вхідні параметри, код обробки, побудову графіків і формування підсумкової таблиці результатів. Така форма є зручною не лише для реплікації результатів, а й для аудиту методики (перевірки, що саме було зроблено на кожному етапі).

Для чисельного моделювання використано бібліотеку k-Wave-python, яка надає програмний інтерфейс до методів k-Wave та дозволяє будувати двовимірні постановки поширення хвиль із поглинальним шаром PML [78–79]. Вибір k-Wave як базового чисельного інструмента є поширеною практикою для задач хвильового моделювання. Для зменшення відбиттів на штучних межах області використано механізм Perfectly Matched Layer (PML) — загальноприйнятий підхід, який має класичне обґрунтування у роботі Беранже [80]. Обробка даних і аналіз виконувались засобами NumPy та SciPy, протоколювання конфігурацій і результатів — у вигляді таблиць Pandas, візуалізація — Matplotlib [81–84]. Саме комбінація цих бібліотек забезпечує як обчислювальну ефективність, так і відтворюваність обробки та аналізу.

3.2. Узгодження “вимірювання–модель” та обчислення метрики точності

Розглянуто методичні засади забезпечення коректного порівняння результатів натурних вимірювань із даними чисельного моделювання, а також підхід до кількісного оцінювання ступеня їх узгодженості.

Підходи до статистичного аналізу сигналів і оцінювання в умовах шуму наведено в [85–87], методи цифрової та спектральної обробки — у [88–90], а

часово-частотного аналізу — у [90–91]. У задачах валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль просте зіставлення часових реалізацій сигналів зазвичай не дає достатньо надійного результату, оскільки відмінності можуть бути зумовлені як властивостями самої моделі, так і впливом шумів, часових зсувів, фазових розбіжностей та багатопромених ефектів. Тому необхідним є попереднє методично обґрунтоване узгодження сигналів у спільному інформаційному просторі порівняння.

Ключовою ідеєю запропонованого методу є перехід від широкосмугового аналізу до вузькосмугового порівняння на робочій частоті, яка є фізично значущою для обраного експериментального сценарію. Такий підхід дозволяє зосередити оцінювання на найбільш інформативній складовій сигналу та зменшити вплив другорядних спектральних компонент і завад. Для досягнення коректності зіставлення перед обчисленням метрики точності виконуються вибір робочої частоти, часове вирівнювання сигналів, їх приведення до зіставної форми та побудова огибаючих, що більш адекватно відображають амплітудну структуру вузькосмугової компоненти.

3.2.1. Визначення робочої частоти f_0 та постановка вузькосмугового порівняння

Подія S5 у SWellEx-96 є багатотонавою: у певний момент часу джерело випромінює комбінацію тонів, і в натурному записі одночасно присутні кілька частотних компонент, а також шум і багатопромениві спотворення. За таких умов пряме порівняння широкосмугових осцилограм є малоінформативним для задачі підбору параметрів дискретної постановки, оскільки похибка може визначатися не тільки точністю чисельної схеми, але й співвідношенням фазових складових та шумів. Тому у даному експерименті застосовано вузькосмуговий підхід: оцінка узгодженості проводиться в смузі навколо робочої частоти f_0 , яка відповідає фізично значущій тональній складовій випромінювання.

Вибір f_0 здійснюється у два кроки. Спочатку формується набір кандидатних тонів за метаданими події S5. Далі для вимірюного сегмента обчислюється спектральна оцінка (рисунок 3.2), і для кожного кандидата оцінюється вираженість відповідної складової. Робочою частотою f_0 обирається та, що має стабільну та значущу амплітуду у спектрі вимірювання. Така процедура зменшує ризик оцінювання моделі на частоті, де сигнал слабкий і підвищує відтворюваність експерименту: за однакових налаштувань алгоритм завжди обирає одну й ту ж f_0 для даного сегмента.

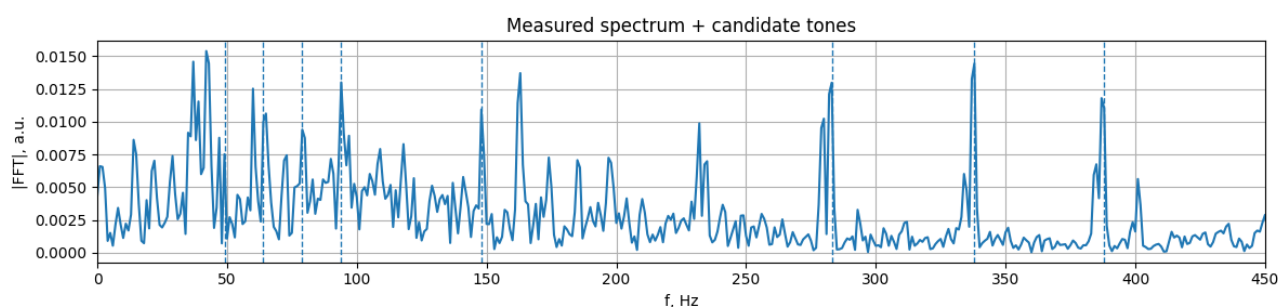


Рисунок 3.2 – Спектр вимірюного фрагмента та кандидатні частоти події S5

Для коректного вузькосмугового порівняння «вимірювання–модель» визначено робочу частоту f_0 як тон, що статистично виражений у спектрі обраного сегмента. На рисунку наведено спектр вимірюного сегмента та позначені кандидатні тони події S5.

3.2.2. Узгодження сигналів та побудова огибаючої

Після формування вимірюного сегмента $p_{meas}(t)$ та обчислення змодельованого сегмента $p_{sim}(t)$ виконується узгодження перед обчисленням метрики точності. Перше джерело некоректності у задачах “вимірювання–модель” полягає у часовій несумісності: навіть при правильній геометрії постановки реальний сигнал може мати часовий зсув відносно модельного через особливості синхронізації даних або різні механізми формування початку події. Тому в експерименті оцінюється часовий лаг між сигналами у вузькій смузі навколо f_0 за крос-кореляцією, після чого сигнали вирівнюються за оціненим зсувом.

Друге джерело некоректності — фазові відмінності, які можуть істотно впливати на похибки у часовій області, хоча з точки зору фізичної адекватності моделі важливішою є амплітудно-енергетична поведінка на робочій частоті. Тому застосовується перетворення до аналітичного сигналу (Гільберт-перетворення) та амплітудно-фазова компенсація, що є стандартним прийомом у вузькосмуговому аналізі та цифровій обробці сигналів. На основі аналітичного сигналу формується огибаюча амплітуди вузькосмугової компоненти:

$$A(t) = | \mathcal{H}(x(t)) |, \quad (3.2)$$

де $x(t)$ — смугово-фільтрований сигнал навколо f_0 ,

$\mathcal{H}$ — Гільберт-перетворення.

Саме огибаюча використовується далі для метрики, оскільки вона є більш стійкою до фазових зсувів, а також менш чутливою до широкосмугових завад, що характерно для натурних записів.

3.2.3. Метрика NMAE як кількісна оцінка узгодженості

Кількісна оцінка узгодженості “вимірювання–модель” виконується за метрикою NMAE (нормалізована середня абсолютна похибка) на огибаючих узгоджених сигналах:

$$NMAE(x, y) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x[n] - y[n]|}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x[n]| + \varepsilon}, \quad (3.3)$$

де $x[n]$ — огибаюча вимірюваного сигналу,

$y[n]$ — огибаюча змодельованого сигналу,

N — довжина вікна,

ε — мале число для уникнення ділення на нуль.

Така нормалізація робить метрику безрозмірною та менш залежною від абсолютного масштабу сигналу, що особливо важливо для натурних вимірювань. Практично NMAE дає один скаляр для кожної конфігурації параметрів θ , що робить її придатною для автоматизованого параметричного пошуку. Реалізація

обчислення метрики та всіх попередніх перетворень виконується у Python із використанням NumPy/SciPy.

3.3. Параметричний простір конфігурацій та протокол серійних прогонів

Визначено параметричний простір конфігурацій, у межах якого здійснюється серійне дослідження чисельної моделі, а також описано протокол виконання обчислювальних експериментів. Методологічні засади верифікації та валідації математичних моделей подано в [101–106], питання відтворюваності Jupyter-орієнтованих обчислень — у [107–110], а загальні принципи відтворюваності наукових досліджень — у [111–116]. На відміну від задач ідентифікації фізичних характеристик середовища, у даній роботі основна увага зосереджена на параметрах самої чисельної постановки та програмної реалізації, зміна яких безпосередньо впливає як на точність відтворення акустичного сигналу, так і на потребу в обчислювальних ресурсах. Саме тому дослідження організовано як контрольований перебір множини конфігурацій з подальшим порівнянням їх за єдиними критеріями якості та вартості обчислення.

Формування такого параметричного простору є необхідним для переходу від одиничних обчислювальних прикладів до систематичного аналізу поведінки моделі. Це дає змогу не лише оцінити чутливість результатів до зміни параметрів дискретизації, поглинального шару та геометрії домену, але й встановити, які саме конфігурації є доцільними з погляду практичного застосування. У контексті валідації математичних моделей особливого значення набуває не просто пошук найточнішого варіанта, а визначення такого набору параметрів, який забезпечує прийнятну точність за обмежень на час виконання розрахунку.

3.3.1. Параметри чисельної постановки та їхній вплив на результат

У межах експерименту оптимізуються саме параметри чисельної постановки, а не фізичні параметри натурного експерименту. Це важливо з методологічної точки зору: мета перевірки полягає у демонстрації того, що відбір здійснюється в просторі параметрів моделі/реалізації (крок сітки, PML тощо), які впливають і на точність, і на ресурси. Базовим параметром дискретизації є PPW (points per wavelength), який задає просторовий крок:

$$dx = \frac{\lambda}{PPW}, \lambda = \frac{c_0}{f_0}, \quad (3.4)$$

де c_0 – опорна швидкість звуку (в експерименті $c_0 = 1500\text{м/с}$),

f_0 – робоча частота.

Швидкість поширення акустичної хвилі у морській воді залежить від температури, солоності та тиску [117, 118].

Збільшення PPW зменшує dx , як правило, знижує чисельну дисперсію, але збільшує кількість вузлів сітки, що веде до зростання часу моделювання.

Другою ключовою групою параметрів є параметри PML: товщина поглинального шару (PML size) і коефіцієнт поглинання (PML alpha). Відповідні параметри контролюють рівень відбиттів на штучних границях області. Недостатній PML призводить до появи паразитних відбиттів, які, у свою чергу, можуть істотно спотворити амплітудну ознаку на робочій частоті, а отже — погіршити NMAE. Водночас збільшення PML збільшує розмір області та ресурсні витрати. Додатково варіювались допоміжні параметри домену: запас домену по довжині хвилі ($y \lambda$) та мінімальний розмір по осі $Y(Ny \min)$, що необхідно для коректності геометрії постановки та уникнення вироджених конфігурацій.

3.3.2. Ресурсний критерій та методика вимірювання часу

Як ресурсний критерій обрано час моделювання. Для чисельних розв’язувачів у часовій області обчислювальна складність у першому наближенні

масштабується як добуток кількості вузлів просторової сітки на кількість часових кроків:

$$T \propto N_x N_y N_t. \quad (3.5)$$

Ця залежність пояснює, чому зменшення dx (через збільшення PPW) або збільшення розмірів домену може призводити до різкого зростання часу моделювання навіть при відносно невеликій зміні параметрів. Звідси випливає, що найточніша конфігурація не завжди є практично застосовною, особливо у випадках обмежених обчислювальних ресурсів.

Щоб час моделювання можна було використовувати як порівнюваний показник, важливо мінімізувати вплив випадкових факторів (фонові процеси, планування потоків, стан системи). Тому для фінальних конфігурацій використовувались повторні запуски, а підсумковий час фіксувався як медіана. Результати прогонів протоколювались у табличній формі засобами Pandas, що дозволяє відтворювано аналізувати та фільтрувати конфігурації. Побудова візуалізацій залежностей “NMAE– dx ” і “час– dx ” виконувалась стандартними засобами Matplotlib.

3.3.3. Логіка серійного перебору та двоетапний відбір

Експеримент реалізовано як серійний перебір дискретного набору конфігурацій. Для кожної конфігурації θ виконується: запуск моделювання, формування модельного сегмента, узгодження сигналів з натурним сегментом у вузькій смузі навколо f_0 , обчислення NMAE та фіксація часу моделювання. На основі зібраної таблиці реалізується двоетапна схема відбору.

На першому етапі визначається еталонна конфігурація максимальної точності для даного натурального фрагмента. Для цього запускається піднабір конфігурацій із консервативними значеннями дискретизації та PML (більший PPW, більший PML size тощо), після чого обирається конфігурація з мінімальним NMAE. На другому етапі виконується пошук ресурсно-ефективної конфігурації за порогом точності: задається умова прийнятності $NMAE(\theta) \leq 0,2$, і серед конфігурацій, що

пройшли поріг, обирається конфігурація з мінімальним часом моделювання. Така схема є інтерпретованою: поріг точності фіксує достатність результату, а критерій часу визначає практичну здійсненність.

3.4. Результати та аналіз компромісу “точність–ресурси”

У результаті серійних прогонів сформовано таблицю конфігурацій, яка містить параметри постановки та результати оцінювання: PPW, dx , параметри PML, розміри сітки $N_x \times N_y$, кількість кроків N_t , час моделювання та значення $NMAE$ за огинаючою вузькосмугової компоненти. Така таблиця є основним артефактом експерименту: вона дозволяє не лише знайти кращу конфігурацію, але й проаналізувати структуру залежностей, наприклад, як змінюється $NMAE$ зі збільшенням dx , або як змінюється час при варіюванні параметрів PML. Крім того, саме таблиця забезпечує відтворюваність висновків: будь-яке твердження про виграш у часі чи рівень точності може бути перевірене за зафіксованими рядками таблиці.

На основі таблиці автоматично виділено дві ключові конфігурації: “Макс. параметри” (мінімальний $NMAE$) та “Опт. параметри” (мінімальний час при $NMAE \leq 0,2$). Для демонстраційного сценарію отримано:

Таблиця 3.1 – Порівняння конфігурацій “Максимальні параметри” та “Оптимальні параметри” (пошукове вікно 0,25 с, запас $\lambda = 0,50$).

Режим	PPW	dx , м	PML size	PML alpha	N_y min	N_x	N_y	N_t	Час мод., с	NMAE
Макс. параметри	20	1.530612	20	2.0	48	1456	48	6930	141.402098	0.014963
Опт. параметри	10	3.061224	10	1.0	32	728	32	3465	47.819362	0.027373

Значення $NMAE$ для “Опт. параметри” залишається значно нижчим за поріг 0,2, тобто точність є достатньою. Одночасно час моделювання зменшується майже

утричі, що є принципово важливим при серійному запуску великої кількості конфігурацій у прикладних задачах.

Для обраного прикладу виграш у часі становить:

$$\frac{141,402098}{47,819362} \approx 2,96,$$

тобто ресурсно-оптимальна конфігурація забезпечує скорочення часу моделювання приблизно у 2,96 раза при збереженні прийнятної точності. Це підтверджує існування області конфігурацій, у межах якої модель є достатньо точною, а вибір конкретного рішення може здійснюватися за ресурсними міркуваннями. Важливо, що така логіка дозволяє уникнути двох крайнощів: 1) вибору надто грубої конфігурації, де NMAE перевищує поріг; 2) вибору надто дорогої конфігурації, де NMAE поліпшується незначно, але час зростає кратно.

Для наочної демонстрації компромісу побудовано графік залежності *NMAE* від dx (рисунк 3.3). Він показує, що зі збільшенням кроку сітки точність загалом погіршується, однак у дослідженому діапазоні зберігається область конфігурацій, для яких значення *NMAE* залишаються прийнятними. При цьому для одного й того самого значення dx могли розглядатися кілька конфігурацій, що відрізнялися іншими параметрами чисельної постановки, насамперед параметрами PML, тому на графіку одному значенню dx може відповідати кілька значень *NMAE*. Зокрема, скупчення точок при $dx \approx 3,1\text{м}$ відображає саме множину таких конфігурацій.

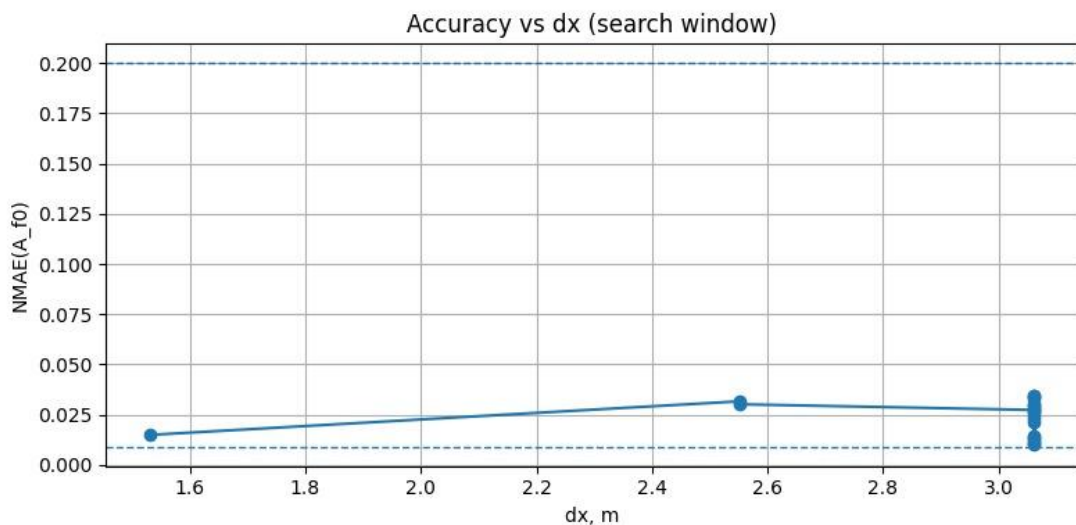


Рисунок 3.3 – Залежність NMAE по $A_{f_0}(t)$ від кроку сітки dx (пошукове вікно)

Для аналізу впливу просторової дискретизації на точність обчислено значення $NMAE$ для набору конфігурацій та побудовано залежність метрики від кроку сітки dx . Верхня пунктирна лінія відповідає пороговому значенню прийнятності $NMAE = 0,2$; усі точки, розташовані нижче цієї лінії, належать до області прийнятних конфігурацій. Нижня пунктирна лінія є допоміжним візуальним орієнтиром для зіставлення малих значень похибки в області practically кращих конфігурацій.

Ресурсна складова аналізу оцінювалась за медіаною часу моделювання для конфігурацій з однаковим dx (рисунок 3.4).

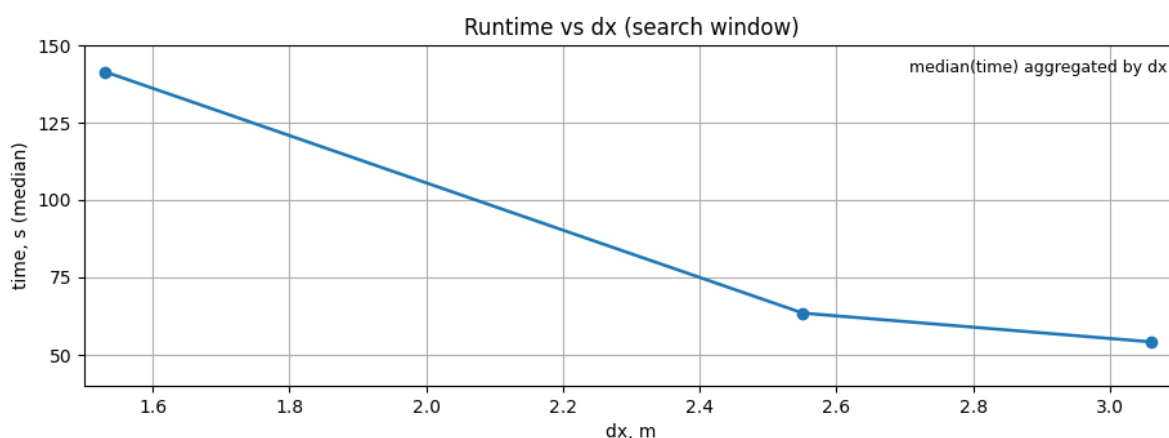


Рисунок 3.4 – Залежність часу моделювання (медіана) від кроку сітки dx (пошукове вікно)

Як видно з залежності, зростання dx приводить до помітного зменшення часу моделювання, що підтверджує наявність практичного компромісу «точність–ресурси».

3.5. Відтворюваність експерименту та програмна автоматизація

Відтворюваність експерименту забезпечується тим, що всі кроки реалізовано у єдиному Jupyter Notebook: від завантаження SWellEx-96, формування сегмента, відновлення дальності та вибору робочої частоти до запуску моделювання, узгодження сигналів і побудови підсумкової таблиці. Такий підхід зменшує ризик “ручних” відхилень у методиці й дозволяє повторити експеримент, змінюючи лише

вхідні параметри (хвилину запису, канал VLA, довжину сегмента або поріг точності).

Табличне протоколювання результатів у Pandas забезпечує прозорий аудит: кожен рядок таблиці містить конкретну конфігурацію параметрів та її результат (NMAE і час). Це дозволяє не лише відтворити кінцевий вибір конфігурації, але й провести додатковий аналіз: наприклад, оцінити вплив одного параметра при фіксації інших або перевірити стабільність вибору при зміні порогу точності.

Чисельне моделювання виконано за допомогою k-Wave-python, який реалізує підходи k-Wave та підтримує застосування PML. Використання цього інструментарію дозволяє зосередити експеримент саме на варіюванні параметрів постановки, а не на розробці нового чисельного методу. Обробка сигналів, узгодження, фільтрація, кореляція та обчислення NMAE виконані у Python із застосуванням NumPy і SciPy. Протоколювання та агрегація результатів (у тому числі медіана часу) виконані в Pandas, а побудова графіків — у Matplotlib [119]. Натурні дані та метадані отримано з відкритих ресурсів SWellEx-96. Загальні принципи застосування цифрової обробки сигналів у задачах аналізу та порівняння часових рядів підтримуються фундаментальними джерелами з DSP.

Висновки до Розділу 3

У третьому розділі експериментально підтверджено працездатність запропонованих методів: методу валідації чисельних моделей поширення гідроакустичних хвиль з узгодженням частот дискретизації та спектральною оцінкою, а також методу вибору параметрів моделі за критеріями точності та ресурсної здійсненності. Експериментальну перевірку виконано на прикладі натурних гідроакустичних даних SWellEx-96 для події S5, що дозволило оцінити можливість застосування розроблених підходів до реальних вимірювальних даних.

У межах перевірки методу валідації чисельних моделей поширення гідроакустичних хвиль з узгодженням частот дискретизації та спектральною оцінкою реалізовано відтворювану процедуру зіставлення сигналів «натурне

вимірювання — результат моделювання». Вона передбачає вибір сегмента експериментального сигналу, автоматичне визначення дальності між джерелом і приймачем, вибір робочої частоти, узгодження частот дискретизації модельного та вимірюваного сигналів, а також спектральне виділення інформативної вузькосмугової компоненти поблизу частоти випромінювача f_0 . Додатково виконувалась компенсація часової затримки та аналіз огинаючої амплітуди через аналітичний сигнал, що зменшило вплив фазових зсувів і забезпечило коректніше порівняння модельних та експериментальних даних. Якість узгодженості оцінювалась за метрикою NMAE, яка дала змогу отримати скалярну та відтворювану оцінку точності для серійного аналізу конфігурацій моделі.

У межах перевірки методу вибору параметрів моделі за критеріями точності та ресурсної здійсненності реалізовано двоетапну процедуру відбору конфігурацій. На першому етапі було визначено конфігурацію з максимальною точністю, яка використовувалась як еталон для порівняння. На другому етапі серед конфігурацій, що задовольняли заданий поріг точності $NMAE \leq 0,2$, було обрано ресурсно-ефективну конфігурацію з мінімальним часом моделювання. За результатами експерименту встановлено, що для демонстраційного сценарію час моделювання було скорочено приблизно у 2,96 рази за умови збереження прийнятного рівня точності. Отриманий результат підтверджує практичну здійсненність автоматизованого вибору параметрів дискретної акустичної моделі в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Відтворюваність експерименту забезпечено його реалізацією у Jupyter Notebook із використанням стандартних бібліотек Python для обчислень, спектральної обробки, оцінювання метрик та протоколювання результатів.

РОЗДІЛ 4. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ ВАЛІДАЦІЇ ТА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ У ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ КОМПЛЕКСАХ

Розглянуто програмну реалізацію запропонованого методу валідації математичних моделей гідроакустичних полів. Описано програмні засоби, що забезпечують практичну реалізацію алгоритмів підготовки та узгодження даних, спектрально-статистичної оцінки узгодженості результатів моделювання з натурними вимірюваннями, а також модуля каскадного відбору конфігурацій і формування області допустимих параметрів Ω .

4.1. Вимоги до програмного комплексу валідації

Запропонований метод валідації реалізовано у вигляді програмного комплексу, який забезпечує автоматизоване виконання основних етапів алгоритму, описаних у другому розділі дисертаційної роботи. Програмна реалізація орієнтована на послідовну обробку експериментальних і модельних гідроакустичних сигналів та формування кількісних показників якості математичних моделей.

Програмний комплекс реалізує послідовний процес: завантаження/підготовка експериментальних і модельних сигналів, приведення їх до порівнюваного вигляду, розрахунок метрик узгодженості та використання цих метрик як критерію “точність” у процедурі відбору конфігурацій за критеріями чисельної коректності та ресурсної здійсненності. Окремо розглянуто структуру модулів, взаємодію компонентів і спосіб представлення результатів користувачеві.

Відображення функціональних можливостей у вигляді діаграми прецедентів

Функціональні можливості програмного комплексу відображено на діаграмі прецедентів (рисунок 4.1), яка демонструє дії користувача та логіку їх

комбінування у межах типових сценаріїв застосування. Діаграма прецедентів дає змогу узагальнено подати взаємодію користувача з програмним комплексом без перевантаження опису деталями реалізації [120].



Рисунок 4.1 – Діаграма прецедентів програмного комплексу валідації

Користувач програмного комплексу взаємодіє із системою через набір прецедентів, що охоплюють повний цикл підготовки даних, моделювання, валідації та аналізу результатів. На діаграмі подано узагальнену структуру основних

сценаріїв роботи, необхідних для експериментальної перевірки чисельної моделі та визначення допустимих областей параметрів.

Початковий етап роботи пов'язаний із доступом до вхідних даних. Для цього передбачено прецедент «Зчитати дані сенсора», який відповідає завантаженню та первинному використанню натурних вимірювань. Після отримання таких даних може виконуватися їх попередня підготовка, представлена прецедентом «Підготувати дані сенсора». Окремо на діаграмі показано можливість «Калібрування AHRS» як додаткового сценарію, що пов'язаний із сенсорними даними та застосовується у випадках, коли для подальшої обробки необхідно врахувати параметри просторової орієнтації та курсу вимірювальної системи [121].

Другий блок сценаріїв пов'язаний із формуванням модельних даних. Для цього користувач може «Підготувати сцену експерименту», після чого виконати прецедент «Виконати моделювання». Результати чисельного розрахунку далі використовуються через прецедент «Завантажити/експортувати дані моделювання», який забезпечує роботу з отриманими файлами результатів. Така послідовність відображає логіку програмного комплексу: модельні сигнали або створюються безпосередньо в межах системи, або відкриваються для подальшої обробки та порівняння.

Центральним для задачі валідації є прецедент «Підготовка даних до порівняння». Саме на цьому етапі виконується приведення натурних і модельних даних до узгодженого вигляду, придатного для коректного зіставлення. Зміст такого етапу охоплює вибір потрібних фрагментів сигналів, узгодження форматів подання, а також підготовку до подальшого обчислення метрик. У скороченій діаграмі цей прецедент подано як окремий функціональний вузол без надмірної деталізації внутрішніх підпроцесів.

Основний сценарій експериментальної перевірки представлено прецедентом «Провести валідацію». Він пов'язаний із двома принципово важливими діями: «Оцінити точність» та «Контроль коректності моделі». Перша з них відповідає кількісному визначенню узгодженості між результатами моделювання та натурними вимірюваннями на основі вибраних метрик. Друга забезпечує перевірку

того, що аналізована конфігурація моделі є чисельно припустимою і не порушує базових умов коректного моделювання. Таким чином, валідація у структурі комплексу розглядається не лише як обчислення похибки, а як поєднання оцінки точності та перевірки коректності отриманих результатів.

Окремий блок прецедентів пов'язаний із серійним аналізом конфігурацій моделі. На діаграмі він представлений прецедентами «Валідація конфігурацій» та «Пакетне моделювання конфігурацій». Така організація відображає можливість багаторазового запуску чисельного розрахунку для дискретної множини параметрів і подальшого порівняння отриманих результатів за критеріями точності та коректності. Саме цей механізм лежить в основі автоматизованого дослідження параметричного простору.

Найбільш методологічно значущим є прецедент «Визначити допустимі області параметрів». Його призначення полягає у відборі таких конфігурацій моделі, які одночасно забезпечують чисельну коректність, прийнятну точність і придатність до практичного використання в межах наявних ресурсних обмежень. Результатом цього сценарію є прецедент «Сформувати область параметрів», який відповідає побудові множини допустимих конфігурацій, що можуть бути використані в подальших дослідженнях або в роботі програмного комплексу як рекомендовані.

Окремо на діаграмі представлено сценарій «Візуалізувати результати», який забезпечує інтерпретацію отриманих даних. Для цього передбачено дві основні форми подання: «Спектральна область» та «Часова область». У спектральному поданні користувач може аналізувати частотні характеристики сигналів, а в часовому — безпосередньо досліджувати форму сигналу в часі. Додатково показано можливості «Змінити параметр» та «Змінити час», які відображають інтерактивний характер аналізу: користувач може змінювати параметри відображення та переходити до різних часових інтервалів під час перегляду результатів.

Слід зазначити, що подана діаграма є скороченою та узагальненою. З метою уникнення перевантаження рисунка на ній відображено лише основні прецеденти

та найбільш суттєві зв'язки між ними. Частина сценаріїв включення та розширення, які реально підтримуються програмним комплексом, на діаграмі умовно не деталізована графічно, однак передбачається на рівні логіки роботи системи. Зокрема, це стосується внутрішніх етапів підготовки даних, уточнення параметрів середовища, окремих процедур налаштування обробки, а також допоміжних дій, що виконуються залежно від конкретного сценарію експерименту.

Загалом діаграма прецедентів демонструє цілісну логіку програмного комплексу як інструменту експериментальної перевірки методу: користувач отримує контрольований і відтворюваний цикл роботи з даними, який поєднує завантаження сигналів, параметризацію постановки, запуск моделювання, процедури підготовки даних і обчислення метрик, а також режим автоматизованого підбору параметрів з формуванням області допустимих конфігурацій. Саме така структура взаємодії забезпечує практичну придатність комплексу для досліджень у задачах валідації гідроакустичних моделей і створює основу для подальших експериментальних досліджень та масштабування функціональних можливостей системи.

Вимоги до програмного забезпечення можна розділити на функціональні та нефункціональні.

Функціональні вимоги

FR-01: Програмний комплекс має забезпечувати зчитування натурних даних сенсора з вхідного файлу або іншого джерела даних.

FR-02: Програмний комплекс має виконувати попередню підготовку даних сенсора, зокрема розділення, калібрування та приведення даних до форми, придатної для подальшої обробки.

FR-03: Програмний комплекс має забезпечувати підготовку сцени експерименту та параметрів чисельної моделі.

FR-04: Програмний комплекс має виконувати чисельне моделювання розповсюдження акустичних хвиль відповідно до заданої конфігурації моделі.

FR-05: Програмний комплекс має забезпечувати завантаження, збереження та повторне використання результатів моделювання.

FR-06: Програмний комплекс має виконувати підготовку натурних і модельних даних до порівняння.

FR-07: Програмний комплекс має забезпечувати проведення валідації математичної моделі шляхом порівняння результатів моделювання з натурними даними.

FR-08: Програмний комплекс має обчислювати метрики точності та узгодженості модельних і натурних даних.

FR-09: Програмний комплекс має виконувати контроль коректності моделі та вхідних даних перед або під час проведення валідації.

FR-10: Програмний комплекс має підтримувати пакетне моделювання та валідацію декількох конфігурацій параметрів моделі.

FR-11: Програмний комплекс має формувати область допустимих параметрів моделі за критеріями точності та ресурсної здійсненності.

FR-12: Програмний комплекс має забезпечувати візуалізацію результатів у часовій та спектральній областях.

Нефункціональні вимоги

NFR-01: Програмний комплекс має забезпечувати відтворюваність результатів моделювання та валідації за однакових вхідних даних і параметрів.

NFR-02: Програмний комплекс має забезпечувати простежуваність результатів, тобто зберігати зв'язок між результатами обчислень, параметрами моделі та даними експерименту.

NFR-03: Програмний комплекс має забезпечувати прийнятний час виконання операцій моделювання, валідації та аналізу параметрів за умов обмежених обчислювальних ресурсів.

NFR-04: Архітектура програмного комплексу має бути модульною, щоб компоненти зчитування даних, моделювання, валідації, аналізу параметрів і візуалізації могли розвиватися незалежно.

NFR-05: Програмний комплекс має бути розширюваним для підключення нових математичних моделей, метрик точності та способів візуалізації.

NFR-06: Програмний комплекс має забезпечувати цілісність даних під час збереження результатів моделювання, даних сенсора та результатів валідації.

NFR-07: Програмний комплекс має бути стійким до некоректних або неповних вхідних даних і має повідомляти користувача про помилки без аварійного завершення роботи.

NFR-08: Інтерфейс користувача має забезпечувати зрозуміле виконання основних сценаріїв: зчитування даних, запуску моделювання, проведення валідації, визначення області параметрів і перегляду результатів.

4.2. Розробка архітектури програмного засобу валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль

Для деталізації внутрішньої структури програмного засобу валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль побудовано компонентну діаграму в нотації C4. На діаграмі відображено основні компоненти ядра програмного комплексу, інтерфейс користувача, сховища даних і результати взаємодії між ними під час завантаження натурних даних, запуску чисельного моделювання, виконання валідації та подальшого аналізу результатів. Компонентну структуру програмного комплексу наведено на рисунку 4.2.

У складі ядра програмного комплексу виокремлено п'ять основних компонентів: компонент роботи з даними сенсора, компонент чисельного моделювання, компонент валідації, компонент відбору параметрів і компонент візуалізації. Компонент роботи з даними сенсора відповідає за підготовку натурних гідроакустичних даних та їх збереження у відповідному сховищі. Компонент чисельного моделювання використовує параметри моделі зі сховища моделей і формує результати змодельованого експерименту.

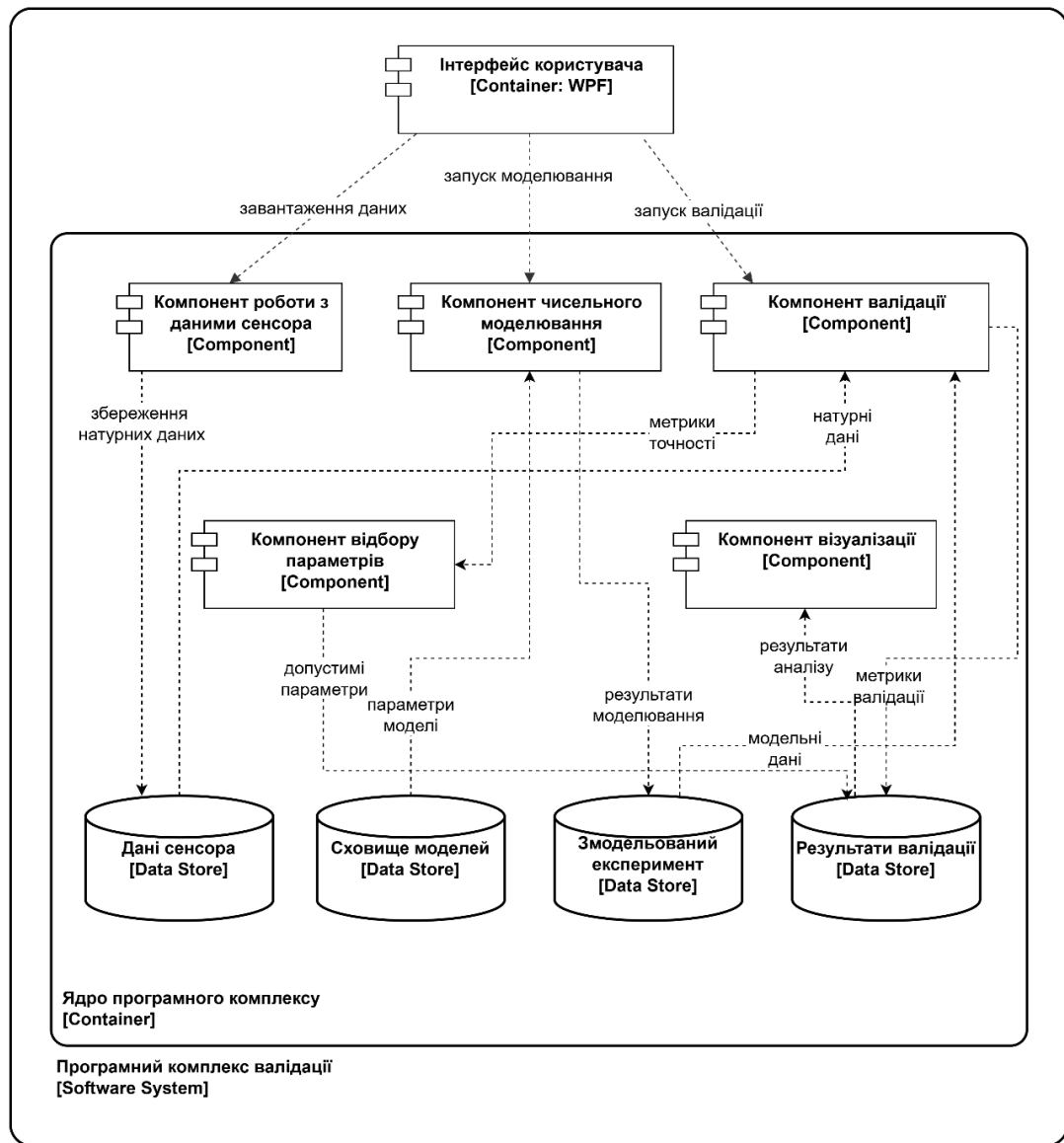


Рисунок 4.2 – Компонентна діаграма С4 програмного комплексу валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль

Центральним елементом діаграми є компонент валідації, який отримує натурні дані, модельні дані та результати моделювання, після чого виконує їх порівняння й обчислення метрик точності. Отримані метрики передаються до компонента відбору параметрів, який формує область допустимих параметрів моделі за критеріями точності та ресурсної здійсненності. Результати валідації зберігаються в окремому сховищі та надалі використовуються компонентом візуалізації для представлення результатів аналізу користувачу. Таким чином, діаграма відображає логіку взаємодії компонентів програмного комплексу та

показує зв'язок між етапами завантаження даних, моделювання, валідації, відбору параметрів і візуалізації результатів.

Архітектуру програмного комплексу організовано за модульним принципом, де кожен модуль відповідає за окрему функціональну частину прикладного процесу: від завантаження і підготовки даних до розрахунку метрик та відбору конфігурацій (рисунок 4.3). Такий поділ дозволяє ізолювати критичні частини методики, що підвищує керованість реалізації, спрощує тестування і забезпечує можливість незалежного розвитку окремих компонентів без порушення загальної логіки. Архітектурне подання програмного комплексу дає змогу формалізувати склад його основних підсистем, модулів і зв'язків між ними в межах єдиного контуру валідації. Така схема відображає логіку проходження даних через етапи отримання, підготовки, чисельного моделювання, оцінювання та збереження результатів. Унаслідок цього архітектурна схема виступає структурною основою для подальшого поетапного аналізу функцій і взаємодії окремих компонентів системи.

На схемі (рисунок 4.3) виділено логічні компоненти для роботи з даними сенсора, модулі підготовки модельних даних і параметрів, контур валідації (узгодження дискретизації, перехід до частотної області, виділення корисної компоненти, розрахунок метрик), модуль формування області параметрів, а також модулі візуалізації у часовому та спектральному діапазонах. Додатково відображено сховища, що відповідають за збереження даних сенсора, моделей, змодельованих експериментів і результатів валідації.

Окрему роль у запропонованій архітектурі відіграє підсистема аналізу параметрів, яка пов'язує результати моделювання, дані сенсора та значення метрик точності з процедурою визначення допустимих конфігурацій моделі. Завдяки цьому програмний комплекс не лише виконує разове порівняння модельних і натурних сигналів, а й забезпечує підтримку процесу вибору параметрів чисельної постановки з урахуванням вимог точності та ресурсної здійсненності.

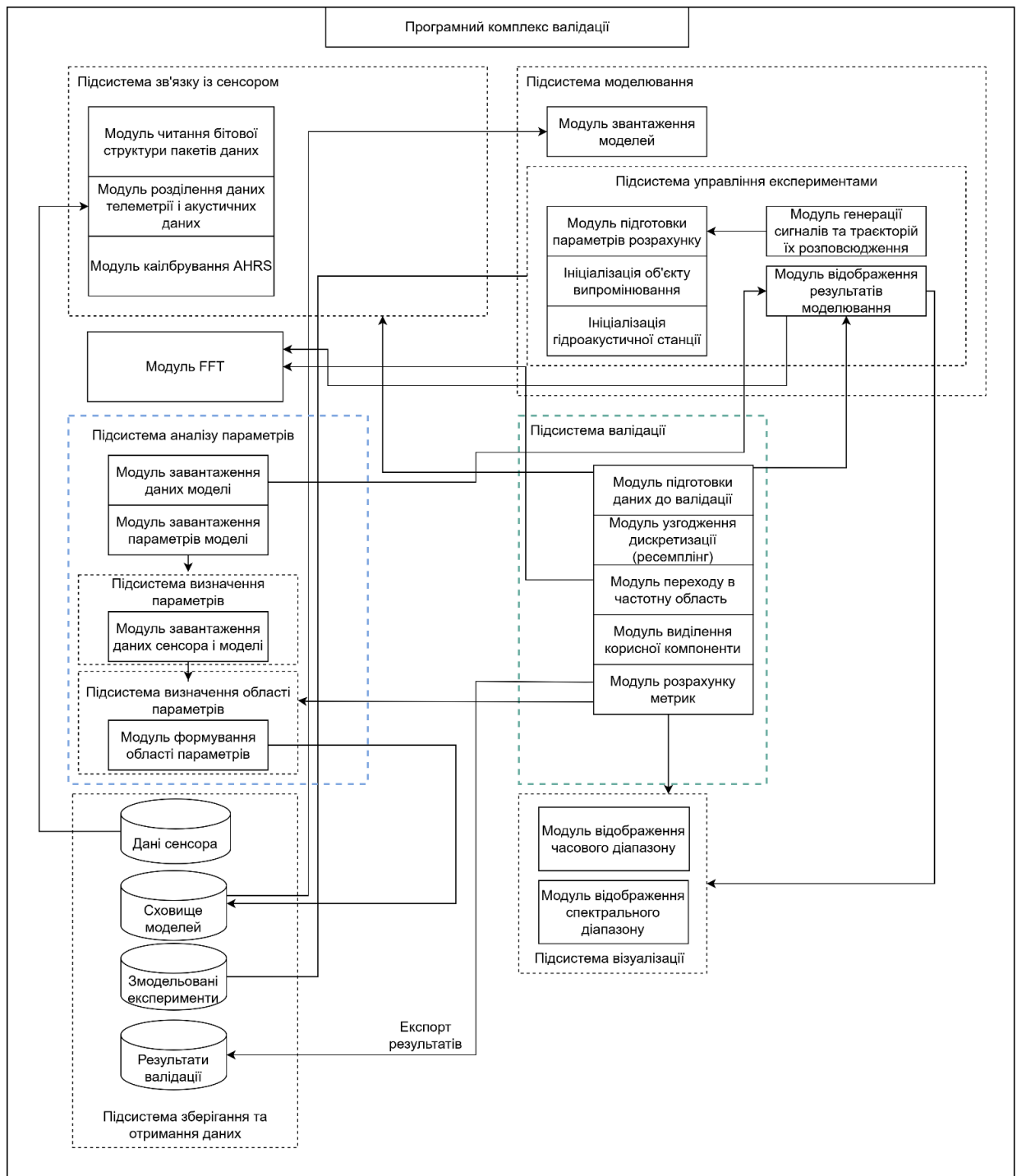


Рисунок 4.3 – Структурно-функціональна схема програмного комплексу валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль з потоками даних

Важливим є також те, що підсистема зберігання та отримання даних забезпечує простежуваність результатів обчислювального експерименту. Кожний результат моделювання або валідації може бути пов'язаний із відповідними вхідними даними, параметрами моделі та сформованими метриками. Це створює

передумови для повторного аналізу результатів, порівняння різних конфігурацій і відтворення експериментів без повторного виконання всіх етапів обчислення.

4.2.1. Логічний компонент обробки та підготовки даних сенсора

Окремою частиною архітектури є підсистема роботи з даними сенсора, оскільки експериментальні дані, як правило, надходять у форматах, не придатних для негайного використання у процедурі порівняння. На рівні модулів це проявляється як послідовність кроків: зчитування бітової структури пакетів, відокремлення телеметричної та акустичної частин, а також обробка допоміжних каналів (зокрема орієнтаційних параметрів), якщо вони впливають на інтерпретацію експерименту або на відбір потрібного фрагмента сигналу. Підсистема має забезпечити приведення експериментальних даних до узгодженого представлення, де акустичний сигнал є явно доступним для наступних кроків обробки.

В архітектурі також виділено модуль FFT як частину інструментарію сигнал-обробки. Він використовується як складова процедур, що потребують переходу до частотної області, та забезпечує уніфікацію спектрального аналізу для різних джерел даних.

4.2.2. Логічний компонент підготовки постановки та керування чисельним моделюванням

Центральний блок архітектури відображає модуль завантаження моделей і модуль підготовки параметрів розрахунку. Важливим є те, що програмний комплекс працює з чисельним розв'язувачем у режимі black-box: система організовує запуск із заданою конфігурацією параметрів, але не змінює внутрішню реалізацію моделі [122]. Така постановка дозволяє поєднувати різні розв'язувачі або різні реалізації моделювання у межах одного програмного контуру, якщо вони забезпечують узгоджений формат вихідних даних для порівняння.

У модулі підготовки параметрів розрахунку виділено ініціалізаційні кроки, пов'язані з об'єктом вимірювання та гідроакустичною станцією. Фактично це означає, що програмний комплекс формалізує сценарій експерименту в параметричній формі, щоб надалі однозначно відтворити умови порівняння між моделлю та натурними вимірюваннями.

4.2.3. Контур валідації як окремий логічний компонент

Праворуч на архітектурній схемі виділено контур валідації як сукупність модулів, що реалізують ключову методику порівняння. Принципово важливо, що ці модулі організовані як послідовний ланцюжок, який перетворює початкові сигнали (експеримент і модель) у порівнювані ознаки, а далі — у числові метрики узгодженості. Саме цей блок забезпечує коректність порівняння в умовах відмінних частот дискретизації та зменшує вплив артефактів дискретизації на результат оцінювання.

У межах валідаційного контуру виділяється модуль підготовки даних (приведення форматів), модуль узгодження дискретизації (ресемплінг із контролем спотворень), модуль переходу у частотну область (спектральний аналіз із фіксованими параметрами), модуль виділення корисної компоненти (орієнтація на інформативну складову), а також модуль розрахунку метрик.

4.2.4. Логічний компонент каскадного відбору конфігурацій і формування області параметрів

Окремим компонентом у структурі виділено модуль формування області параметрів, який відповідає за реалізацію каскадної процедури відбору конфігурацій. Логіка цього модуля полягає в тому, що метрики узгодженості, отримані у контурі валідації, використовуються як критерій “точність” при відборі конфігурацій дискретної множини Θ . Перед тим як аналізувати точність, модуль забезпечує застосування умов чисельної коректності та критеріїв здійсненності на

заданих ресурсах. У результаті формується множина Ω , яка містить лише ті конфігурації, що одночасно є коректними, здійсненими та достатньо точними. Якщо в конкретній постановці необхідно контролювати стабільність результату при контрольній зміні постановки, модуль може бути розширений перевіркою самоузгодженості.

У практичному сенсі цей модуль перетворює “набір розрізнених запусків” у методично оформлену процедуру експериментальної перевірки: система не просто рахує метрики, а робить висновок про допустимість конфігурації і документує причини відбору або відсіву.

4.2.5. Представлення результатів, сховища даних та керування артефактами експерименту

Архітектура включає модулі представлення результатів у часовій та спектральній областях. Їх призначення - забезпечити інструментальну підтримку інтерпретації результатів: користувач має змогу співставити графічні представлення узгоджених сигналів зі значеннями метрик і тим самим контролювати адекватність обробки. Окремо передбачено модулі відображення результатів моделювання та модулі генерації допоміжних візуалізацій, зокрема траєкторій розповсюдження, якщо це використовується в прикладній постановці.

Сховища даних у структурі (дані сенсора, сховище моделей, змодельовані експерименти, результати валідації) відображають практичну потребу у повторюваності. Оскільки експериментальна перевірка методу передбачає серії прогонів і порівнянь, важливо відокремлювати “сирі” входи від проміжних результатів і фінальних артефактів, включно з протоколами відбору Ω . Це дозволяє повторювати експерименти, порівнювати серії запусків і уникати ситуації, коли результат неможливо відтворити через відсутність зафіксованих параметрів або версій даних.

4.2.6. Динамічна взаємодія компонентів при валідації та підборі параметрів

Діаграма послідовності на рисунок 4.4 відображає динаміку взаємодії основних компонентів програмного комплексу під час виконання двох ключових сценаріїв роботи: 1) валідації конкретної конфігурації без підбору параметрів і 2) автоматизованого підбору параметрів із формуванням області допустимих конфігурацій Ω . На відміну від статичної архітектурної схеми, яка фіксує склад модулів і їх призначення, діаграма послідовності демонструє фактичний порядок викликів між користувачем, користувацьким інтерфейсом, модулем валідації, модулем підбору параметрів, солвером (моделлю) та підсистемами збереження даних і результатів. На початку обох сценаріїв відображено ініціалізаційний етап, у межах якого користувач через інтерфейс здійснює вибір або завантаження вихідних даних. Дані сенсора отримуються з відповідного сховища, після чого формується внутрішнє подання експериментального сигналу, а дані моделювання або параметри моделі завантажуються зі сховища моделей. Далі виконується ініціалізація постановки, яка включає приведення “сирих” джерел до узгодженого стану з точки зору структури даних і метаданих. Важливо, що на цьому етапі система відокремлює підготовку даних як інфраструктурний крок від власне чисельного моделювання і від оцінки узгодженості, завдяки чому забезпечується повторюваність: однаковий набір вхідних даних може бути використаний для одиничної валідації або для серії прогонів при підборі параметрів.

У першому сценарії, який на діаграмі представлено як режим “валідація без підбору”, користувач ініціює запуск валідації конкретної конфігурації. Після цього інтерфейс передає керування модулю валідації, який запускає моделювання з вибраними параметрами. Розв’язувач виконує розрахунок і повертає результат моделювання, який протоколюється у сховищі змодельованих експериментів. Далі модуль валідації переходить до власне оцінювання: виконує підготовку даних до порівняння, обчислює метрики узгодженості для пари “експеримент – модель” та зберігає отримані результати у сховищі результатів валідації. Після завершення

розрахунків дані передаються у модуль візуалізації, де користувачу можуть бути показані графіки та числові значення метрик.

Таким чином, у межах одиничної валідації діаграма показує наскрізний конвеєр: від завантаження даних через запуск розрахунку до отримання метрик і візуалізації, при цьому збереження проміжних та кінцевих артефактів забезпечує можливість повторного аналізу без повторного запуску моделювання.

Другий сценарій, який на діаграмі представлено як режим підбору параметрів, є розширенням першого і відрізняється наявністю циклу перебору конфігурацій та формалізованої логіки відбору. Користувач через інтерфейс задає параметри підбору та ініціює процедуру, після чого керування переходить до модуля підбору параметрів. На відміну від одиничної валідації, модуль підбору виконує не один запуск солвера, а послідовність запусків для різних конфігурацій параметричного простору, кожного разу ініціюючи моделювання з поточними параметрами. Результати кожного запуску зберігаються у сховищі змодельованих експериментів, після чого для цієї конфігурації виконується розрахунок метрик узгодженості та, за потреби, додаткові перевірки, що дозволяють приймати рішення про придатність конфігурації. Важливо, що діаграма показує наявність етапу визначення “статусу придатності” конфігурації на основі обчисленої метрики та інших критеріїв, після чого відбувається оновлення стратегій пошуку або параметрів перебору. Така логіка відображає каскадну природу відбору конфігурацій: система не просто збирає числові значення метрик, а перетворює їх на рішення про включення/невключення конфігурації до області допустимості.

Після завершення циклу перебору модуль підбору параметрів виконує фіналізацію результатів: формує підсумкові дані, які зберігаються у сховищі результатів валідації, і передає їх на візуалізацію. У результаті користувач отримує не лише метрики для окремих запусків, а й узагальнену картину допустимих конфігурацій у межах заданого сценарію та обмежень.

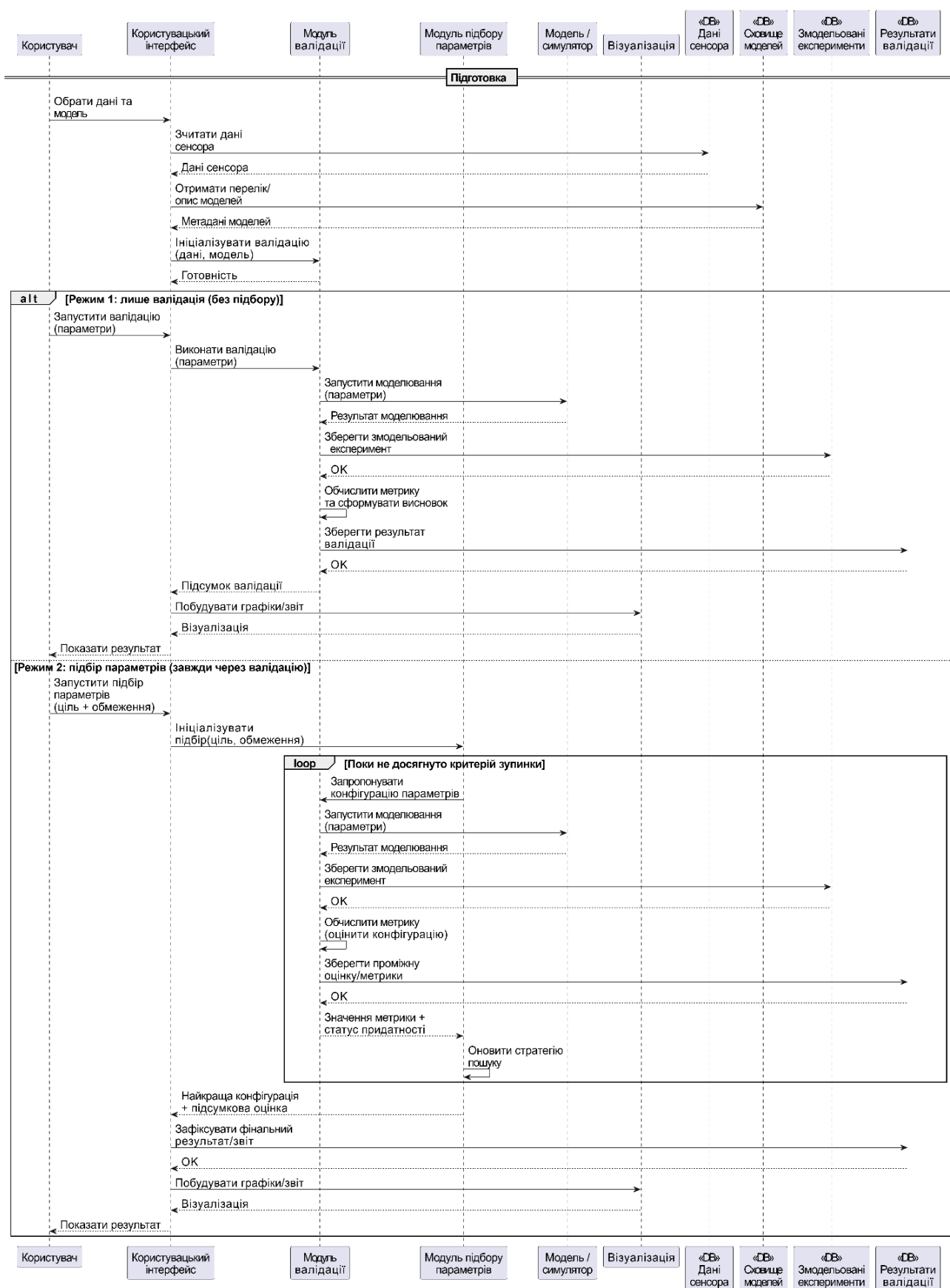


Рисунок 4.4 – Діаграма послідовності програмного комплексу валідації

При цьому діаграма демонструє, що збереження результатів відбувається на двох рівнях: окремо фіксуються змодельовані експерименти як “сирі” виходи розв’язувача, і окремо фіксуються результати валідації як узагальнені артефакти (метрики та висновки щодо придатності). Такий поділ є принциповим для відтворюваності, оскільки дозволяє повторно виконувати аналіз метрик або візуалізацію без повторного виконання дорогих чисельних розрахунків.

Загалом, діаграма послідовності узгоджує статичну модульну архітектуру з практичним потоком виконання і демонструє, що програмний комплекс реалізує метод у двох режимах: як інструмент валідації конкретної конфігурації та як інструмент автоматизованого дослідження параметричного простору з формуванням області допустимих параметрів. Відображені на діаграмі зв’язки між модулем валідації та модулем підбору параметрів також підкреслюють методологічну залежність: підбір параметрів використовує процедури валідації як обов’язковий крок для прийняття рішення, тоді як валідація може виконуватися незалежно як самостійний сценарій роботи користувача.

4.3. Реалізація процесів завантаження даних і запуску моделювання

Для практичного застосування розробленого програмного засобу принципово важливо, щоб процеси імпорту, попередньої перевірки, підготовки даних, вибору чисельної моделі та запуску розрахунку були організовані як цілісний керований сценарій. Саме така організація дає змогу мінімізувати вплив випадкових дій користувача, підвищити надійність експлуатації програмного комплексу та забезпечити повторюваність обчислювальних експериментів.

На відміну від суто алгоритмічного опису моделі, програмна реалізація повинна враховувати вимоги до зручності роботи користувача, контролю коректності вхідних даних, прозорості виконання окремих етапів і збереження отриманих результатів для подальшого аналізу [123, 124]. Тому в межах цього підрозділу увагу зосереджено не лише на технічному запуску моделювання, а й на тих інтерфейсних та архітектурних рішеннях, які забезпечують узгоджене функціонування підсистем завантаження, внутрішнього подання даних,

параметризації обчислювальної постановки, контролю прогресу та повторного використання результатів.

Початковим етапом роботи є імпорт вхідних даних. На цьому етапі користувач обирає файл із даними, після чого система виконує попередню перевірку його придатності до подальшої обробки. Перевіряється доступність файла, можливість формування послідовності відліків необхідної довжини, узгодженість структури даних і відсутність очевидних порушень формату. Такий контроль дозволяє відсіяти некоректні вхідні дані ще до виконання ресурсоємних операцій, зокрема фільтрації, спектрального перетворення та статистичного порівняння. У разі виявлення помилки процес імпорту завершується керовано, а користувач отримує повідомлення про неможливість використання файла в поточному сценарії обробки.

Для реалізації поетапного процесу відкриття, підготовки та попередньої обробки даних у програмному засобі використано набір класів модуля Scene3DFile, що входить до складу бібліотеки користувацьких елементів. Ці класи забезпечують відкриття файлу з даними моделювання, виконання калібрування, фільтрацію, ресемплінг та формування структури даних, придатної для подальшої валідації й візуалізації. Структуру класів, які беруть участь у цьому процесі, наведено на рисунку 4.5. Розглянемо цю діаграма класів як приклад, що відображає структуру модуля Scene3DFile, який забезпечує реалізацію першого етапу алгоритму – поетапне відкриття та підготовку даних для подальшого аналізу. Усі основні класи модуля реалізовані як часткові класи (partial) і пов'язані з елементами інтерфейсу користувача WPF. Базовими для них є стандартні класи Window та Application, що забезпечують інтеграцію модуля в загальну структуру графічного застосунку.

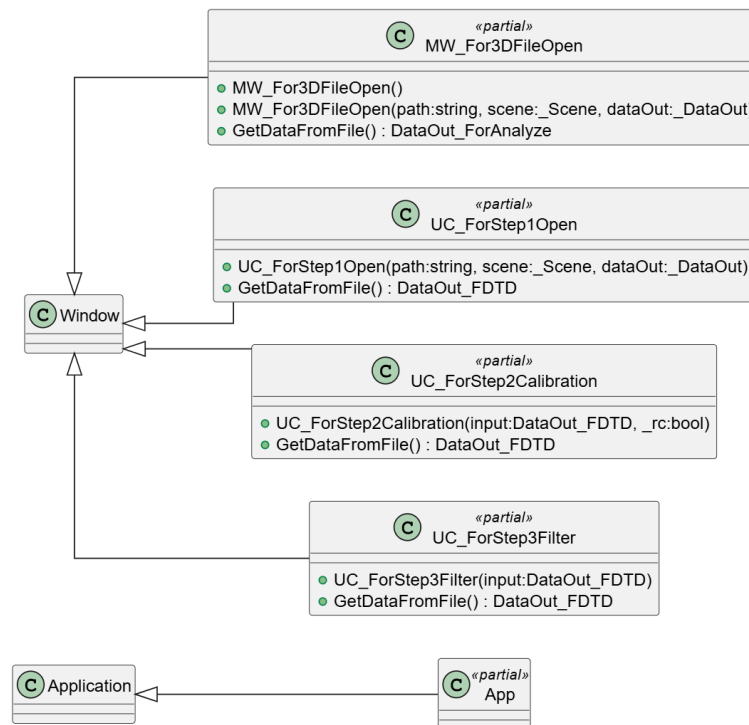


Рисунок 4.5 – Діаграма класів модуля відкриття та попередньої обробки даних

Клас MW_For3DFileOpen реалізує головне вікно керування багатокроковою процедурою відкриття та обробки файлу з даними моделювання. Він відповідає за ініціалізацію процесу, передавання шляху до файлу, параметрів сцени та структури параметрів попередньої обробки.

Клас UC_ForStep1Open реалізує відкриття файлу та зчитування даних польового або модельного експерименту. Він приймає шлях до файлу, параметри сцени та об'єкт налаштувань попередньої обробки. Результатом роботи класу є об'єкт DataOut_FDTD, який містить зчитані дані у форматі, придатному для наступних етапів обробки.

Клас UC_ForStep2Calibration відповідає за калібрування даних. На цьому етапі виконується перетворення між коливальною швидкістю та акустичним тиском або у зворотному напрямку.

Клас UC_ForStep3Filter реалізує фільтрацію та зміну частоти дискретизації. У межах цього етапу можуть виконуватися низькочастотна FIR-фільтрація, інтерполяція та децимація сигналу для приведення даних до необхідної частоти дискретизації. Результатом роботи класу є підготовлений об'єкт DataOut_FDTD,

який може бути використаний у подальшому спектральному аналізі, валідації або візуалізації.

Після успішного відкриття файлу формується внутрішнє подання даних, яке використовується в наступних етапах аналізу та валідації. Це подання містить узгоджені масиви сигналів, параметри дискретизації, часові межі оброблюваного фрагмента, а також, за потреби, сформовані спектральні представлення. Наявність такого проміжного об'єкта дозволяє уникнути повторного зчитування файлу при подальшому перегляді або повторному аналізі результатів. Це підвищує швидкодію програмного засобу та забезпечує відтворюваність налаштувань обчислювального експерименту.

Окремим етапом є підготовка параметрів чисельної постановки. У програмному засобі редагування параметрів відокремлено від безпосереднього запуску розрахунку. Такий поділ є важливим з позиції інженерії програмного забезпечення, оскільки він зменшує ризик змішування етапу налаштування з етапом виконання моделювання. Параметри сцени, джерела, приймачів, траєкторії, сітки та інших складових розрахунку розглядаються як формалізована конфігурація, яку можна зберігати, повторно використовувати та порівнювати з іншими конфігураціями у серії прогонів.

Запуск FDTD-моделювання реалізовано як окрему дію користувача після завершення редагування параметрів. Це дозволяє однозначно зафіксувати момент старту розрахунку та розглядати кожний запуск як окремий експериментальний прогін. Під час виконання моделювання система контролює стан обчислювального процесу, відображає прогрес і обмежує доступ до дій, які можуть порушити коректність поточного розрахунку. Такий механізм важливий для довготривалих або серійних прогонів, де користувач має бачити стан виконання, але не повинен випадково змінювати параметри вже запущеного експерименту.

Результати моделювання протоколюються у вигляді набору артефактів, достатніх для подальшого аналізу та перевірки. Зберігається не лише чисельний вихід моделі, а й контекст його отримання: параметри постановки, ідентифікатори конфігурації, ознаки завершеності розрахунку та службові дані, необхідні для

повторного використання результатів. Це дає змогу виконувати подальшу візуалізацію, спектральну обробку, розрахунок метрик і порівняння з натурними даними без повторного запуску ресурсоємного моделювання.

Таким чином, реалізація процесів завантаження даних і запуску моделювання забезпечує повний цикл підготовки обчислювального експерименту: від вибору та перевірки вхідного файлу до формування внутрішнього подання даних, налаштування чисельної постановки, запуску FDTD-розрахунку, протоколювання та збереження результатів. Деталізовані екранні форми програмного засобу, що ілюструють послідовність дій користувача під час імпорту даних, редагування параметрів, запуску моделювання, контролю прогресу та повторного використання результатів, наведено в Додатку Д.

4.4. Реалізація алгоритмів підготовки та обробки сигналів

У задачах аналізу гідроакустичних сигналів саме етап попередньої обробки визначає коректність наступних процедур порівняння, оскільки будь-які неузгодженості у форматі даних, масштабі фізичних величин, часовій сітці або частотному поданні можуть суттєво впливати на достовірність отриманих результатів. Тому програмний комплекс реалізує ці процедури як послідовний керований конвеєр, у межах якого кожний етап має визначене функціональне призначення та логічно пов'язаний із наступними кроками аналізу.

Особливість запропонованої реалізації полягає в поєднанні двох вимог: з одного боку, необхідно забезпечити достатню гнучкість для роботи з різними типами експериментальних записів і режимами аналізу, а з іншого — гарантувати відтворюваність та однозначність перетворень. Саме тому алгоритми відкриття даних, калібрування, ресемплінгу, спектральної обробки та виділення інформативних характеристик реалізовано не як ізольовані операції, а як взаємопов'язані програмні модулі, що функціонують у межах єдиного обчислювального сценарію. Такий підхід дає змогу не лише автоматизувати

обробку сигналів, але й мінімізувати ризик помилок, пов'язаних із некоректним заданням параметрів або порушенням послідовності виконання процедур.

Для реалізації алгоритмів підготовки та обробки сигналів у програмному засобі використано окремий модуль підготовки даних, який містить класи для зберігання параметрів обробки, представлення вхідних даних, попередньо оброблених даних і результатів спектрального перетворення. Такий підхід дає змогу відокремити параметри конфігурації обробки від самих масивів сигналів і забезпечити єдину структуру даних для подальших етапів валідації. Діаграму класів модуля підготовки та обробки даних наведено на рисунку 4.6.



Рисунок 4.6 – Діаграма класів модуля підготовки та обробки даних

Кероване відкриття даних та індикація прогресу підготовки

Підготовка експериментальних сигналів у програмному комплексі реалізована як керований конвеєр, який починається з відкриття даних і супроводжується індикацією прогресу. Це рішення відображає практичну необхідність працювати з великими обсягами записів і одночасно зберігати прозорість процесу: користувач повинен розуміти, на якій стадії перебуває обробка та чи завершився поточний етап успішно. На цьому кроці формується первинне внутрішнє подання даних: відновлюється послідовність відліків, виконується базова перевірка узгодженості масивів, а також ініціалізуються структури для

подальших перетворень. Важливо, що індикатор прогресу тут не є формальним елементом інтерфейсу: він відображає реальні стани багатокрокової процедури й готує користувача до того, що наступні кроки можуть бути обчислювально затратними.

На рівні внутрішньої логіки цей етап закладає основу відтворюваності: після завершення відкриття даних система має чітко зафіксоване подання сигналу, що містить метадані дискретизації, часові межі, а також параметри подальшого аналізу, обрані на етапі імпорту. Це дозволяє уникнути ситуації, коли один і той самий файл обробляється з різними налаштуваннями за замовчуванням, що унеможлиблювало б коректне порівняння результатів серійних експериментів.

Калібрування – перетворення між коливальною швидкістю і тиском

Другим кроком підготовки є калібрування даних, яке у практичній реалізації розглядається як перетворення інформації між коливальною швидкістю та акустичним тиском [125]. Виділення цього етапу в окремий модуль пояснюється тим, що вхідні дані можуть представляти різні фізичні величини залежно від джерела та конфігурації експерименту. Для коректної валідації необхідно забезпечити узгоджене фізичне подання того, що саме порівнюється між експериментом і моделлю. Калібрування в конвеєрі виконується перед ресемплінгом і спектральним аналізом, оскільки після переходу в частотну область будь-які масштабні або одиничні неузгодженості можуть проявлятися як зміщення амплітуди або помилкова інтерпретація корисної компоненти.

Практично цей крок забезпечує стабільність наступних етапів: калібрований сигнал стає базою для фільтрації, ресемплінгу і FFT, а отже вихід калібрування повинен бути узгодженим за розмірами й не містити нефізичних стрибків або пропусків. Саме тому після калібрування система виконує контроль узгодженості сформованих масивів і лише після цього переходить до зміни частоти дискретизації.

Фільтрація даних: інтерполяція, децимація і згладжування

Третій етап реалізує логіку зміни частоти дискретизації в керованій формі, поєднуючи інтерполяцію, згладжування і децимацію [126]. У контексті валідації

цей крок критичний: експериментальні дані й модельні результати часто мають несумісні частоти дискретизації, і без узгодження неможливо виконати порівняння на одній часовій сітці та коректно перейти до частотного аналізу. Реалізація ресемплінгу як процедура, що складається з етапів інтерполяції, згладжування та децимації забезпечує контроль спектральних спотворень, оскільки згладжування виконує функцію бар'єра від аліасингу під час зниження частоти дискретизації. На практиці це проявляється в тому, що система спочатку формує проміжне подання з більш густою сіткою, потім застосовує фільтрацію, і лише після цього виконує прорідження.

Особливістю практичної реалізації є орієнтація на серійність: обробка має бути достатньо швидкою для пакетного застосування, тому операції виконуються так, щоб уникати зайвих перетворень і дублювання даних. Після завершення цього етапу сигнал переходить у стан, придатний для наступного етапу FFT, причому збережено узгодженість між компонентами/каналами, якщо обробляється не один ряд, а набір взаємопов'язаних сигналів.

Перетворення Фур'є для аналізу частот

На четвертому етапі система виконує перехід у частотну область за допомогою FFT [126]. У практичній реалізації спектральний аналіз організовано так, щоб забезпечити відтворюваність та контроль роздільності оцінювання. Це означає, що параметри частотної обробки, задані при імпорті, реально впливають на структуру спектральних даних: кількість точок у спектрі, крок за частотою, а також поведінку при розбитті сигналу на вікна. FFT у конвеєрі виконується не як разова операція, а як частина процедури, після якої отримані спектри стають вхідними даними для виділення амплітуди та фази і подальшого обчислення метрик узгодженості.

Практично спектральна обробка дає можливість перейти від порівняння форми сигналу до порівняння інформативних спектральних характеристик, зокрема до аналізу корисної складової на заданих частотах або до аналізу спектра в часі, якщо застосовується сегментація та перекриття вікон. Саме тому реалізація FFT інтегрована з інтерфейсом візуалізації: користувач може не лише отримати

числові значення спектральних компонент, а й одразу побачити їх графічне представлення в одному з режимів аналізу.

Виділення амплітуд і фаз зі спектрів та формування ознак для валідації

П'ятий етап завершує первинний цикл підготовки: система витягує з отриманих спектрів амплітудні та фазові характеристики, формуючи компактний набір ознак, придатний для подальшої валідації. Важливо, що після FFT самі комплексні спектри є “сирим” представленням; для практичного порівняння потрібні похідні характеристики, які можна інтерпретувати та використовувати у метриках. Тому реалізація завершується перетворенням спектральних даних у структури, де амплітуда й фаза організовані узгоджено для всіх компонент, а також можуть бути доповнені взаємними фазовими чи напрямними характеристиками, якщо такий аналіз застосовується.

Окремо в реалізації передбачено, що параметри спектральної обробки можуть підбиратися експериментально для досягнення кращої практичної придатності. Зокрема, досліджується вплив частотної роздільності, якості перекриття вікон, часу усереднення та кількості вибірок для усереднення на стабільність і інтерпретованість отриманих спектральних ознак. Результати таких експериментів можуть бути використані як обґрунтування вибору параметрів обробки в конкретному сценарії, а також як пояснення того, чому один і той самий сигнал у різних режимах аналізу дає різну гладкість спектральних залежностей або різну чутливість до шумових складових. У підсумку результатом алгоритму, описаного у підрозділі 4.4, є структурований набір ознак (амплітудно-фазові залежності та похідні представлення у час-частотній формі), який передається в модуль розрахунку метрик узгодженості та використовується далі в процедурі валідації та відбору конфігурацій.

На етапі верифікації параметрів моделювання програмний засіб здійснює перевірку повноти, коректності та допустимості вхідних даних, необхідних для подальшого виконання обчислювального експерименту. Одним із критично важливих параметрів є частота акустичного сигналу, оскільки саме вона безпосередньо впливає на налаштування моделі розповсюдження хвиль, вибір

розрахункових умов та коректність формування результатів моделювання. За відсутності виділеного значення частоти або у випадку неправильного задання параметрів система не може гарантувати достовірність подальших обчислень, тому процес моделювання повинен бути зупинений ще до етапу запуску розрахунку.

У такій ситуації програмний комплекс автоматично формує повідомлення про помилку типу Error з текстом: «Частота не виділена: параметри моделювання задані неправильно».

Наведене на рисунку повідомлення демонструє реалізацію механізму раннього виявлення помилок у програмному забезпеченні валідації та верифікації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль. Його використання дає змогу запобігти переходу до наступних етапів обробки даних за умов, коли початкові параметри є неповними або суперечливими. Такий підхід є важливим з погляду підвищення надійності програмно-апаратного комплексу, оскільки зменшує ймовірність отримання некоректних результатів моделювання та знижує витрати часу на аналіз помилок, що могли б бути виявлені вже після завершення обчислень.

4.5. Реалізація алгоритмів спектральної та статистичної оцінки

Після завершення етапів імпорту, калібрування, узгодження частот дискретизації, фільтрації та формування ознак для порівняння наступним функціональним блоком програмного засобу є модуль спектральної та статистичної оцінки. Його призначення полягає не лише у побудові наочних графічних представлень, а насамперед у забезпеченні формалізованого, відтворюваного та інтерпретованого порівняння натурних і змодельованих даних. У межах розробленого програмного засобу цей модуль реалізує перехід від підготовлених часових рядів до набору кількісних характеристик, які можуть бути використані як для візуального аналізу, так і для автоматизованого обчислення метрик узгодженості. Для кількісного зіставлення сигналів у часово-частотному представленні в суміжних задачах також можуть застосовуватися критерії

невідповідності та узгодженості, які можуть доповнювати класичні похибкові метрики узгодженості [127].

Принципово важливо, що на даному етапі вже не виконуються первинні операції підготовки даних у сирому вигляді. Вважається, що натурний та модельний сигнали попередньо пройшли обробку згідно із запропонованими раніше методами: узгодження за частотою дискретизації, нормалізацію амплітудного масштабу, контроль наявності корисної складової, перевірку фазової узгодженості та формування фрагментів однакової довжини. Саме тому візуалізації, наведені далі, слід трактувати не як відображення “сирих” даних, а як результат роботи попередніх етапів методу, підготовлений для безпосереднього зіставлення натурального сигналу з сигналом, отриманим у чисельному експерименті.

У межах розробленого програмного засобу для аналізу результатів порівняння натурних і змодельованих даних реалізовано окремий функціональний інтерфейс, організований у вигляді чотирьох взаємопов’язаних вкладок. Така структура забезпечує послідовний перехід від візуального аналізу підготовлених сигналів до кількісної оцінки ступеня їх узгодженості. Зокрема, інтерфейс містить вкладки Oscillogram, Spectrum Graphs, Amplitude by Frequency та Main Results (Metrics). Кожна з них відповідає окремому етапу аналізу і разом вони утворюють єдиний цикл оцінювання результатів моделювання.

Вкладка Oscillogram призначена для відображення часових реалізацій натурального та змодельованого сигналів, що дає змогу оцінити їх загальну форму, наявність часових зсувів, характер коливального процесу та якість попереднього узгодження даних. Вкладка Spectrum Graphs використовується для аналізу частотної структури сигналів і дозволяє зіставити розподіл спектральної енергії в натурних та модельних даних. Вкладка Amplitude by Frequency реалізує режим виділення амплітуди корисної складової на заданій частоті, що є особливо важливим для подальшого формування ознак і обчислення статистичних показників. Завершальна вкладка Main Results (Metrics) призначена для подання підсумкових числових характеристик, які відображають ступінь відповідності між натурними та змодельованими даними за обраними критеріями.

Така побудова інтерфейсу має не лише ергономічне, а й методичне значення. Вона відображає логіку запропонованого підходу до валідації: від часового подання сигналу — до його спектрального аналізу, далі до виділення інформативних параметрів і, насамкінець, до формалізованої кількісної оцінки. Це дозволяє користувачу послідовно контролювати всі основні етапи аналізу та інтерпретувати підсумкові метрики не ізольовано, а в контексті проміжних візуальних результатів.

Аналіз узгоджених осцилограм

Першим режимом, що використовується в модулі оцінки, є відображення осцилограм натурного та змодельованого сигналів. У цьому режимі інтерфейс подає два окремі графіки: верхній відповідає натурним даним, нижній — результатам моделювання. Така організація обрана свідомо. Хоча пряме накладання двох кривих в одній системі координат інколи зручне для ілюстративних матеріалів, у практичному інструменті роздільне відображення є інформативнішим, оскільки дає змогу уникнути візуального перекриття ліній, краще розрізняти локальні піки, западини та коливальні переходи, а також спрощує сприйняття за наявності шуму або дрібномасштабних відмінностей.

Осцилограма виконує роль першого діагностичного засобу. Приклад такої осцилограми зображено на рисунку 4.7. Вона дозволяє встановити, чи коректно було виконано часове узгодження сигналів, чи немає грубого зсуву між вимірюванням і моделлю, чи співпадає загальний характер зміни амплітуди у часі, а також чи не втрачено корисну складову внаслідок надмірної фільтрації або некоректної параметризації моделі. На цьому рівні користувач може швидко виявити ситуації, коли формальна числова метрика ще не обчислена, але вже очевидно, що дані не можуть вважатися узгодженими: наприклад, коли сигнал моделі демонструє іншу тривалість коливального процесу, іншу огинаючу або ознаки систематичного запізнення.

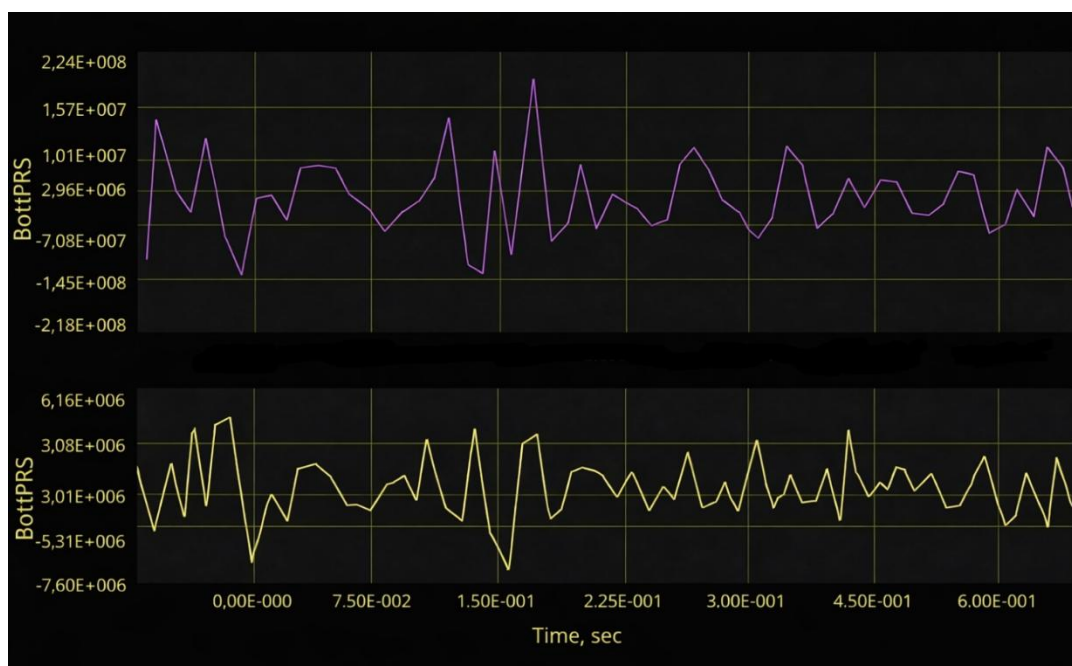


Рисунок 4.7 – Відображення узгоджених осцилограм натурного та змодельованого сигналів у часовій області

Разом з тим осцилограма не розглядається як самодостатній інструмент оцінки якості моделі. Причина полягає в тому, що натурні гідроакустичні дані, як правило, містять шумові та паразитні компоненти, а модельний сигнал може незначно відрізнятись за фазою навіть за загальним коректним відтворенням фізичного процесу. У такій ситуації візуально схожі криві не завжди означають дійсно добру узгодженість, і навпаки — локальні розбіжності на осцилограмі не завжди свідчать про непридатність моделі. Саме тому часове представлення в реалізації використовується як початковий, але не фінальний рівень аналізу. Його основне призначення — забезпечити зрозумілу для дослідника інтерпретацію того, які саме сигнали далі передаються на спектральну обробку і за якими даними формуються числові критерії.

З практичної точки зору такий режим корисний ще й тим, що підтримує пояснюваність результатів роботи програмного засобу. Користувач бачить не лише підсумкове значення метрики, а й часові реалізації, з яких ця метрика опосередковано походить. Це важливо для задач валідації, де недостатньо отримати одне число; необхідно також мати можливість обґрунтувати, чому це число було

отримане, на яких даних воно базується та наскільки фізично правдоподібними є сигнали, що порівнюються.

Реалізація спектрального представлення сигналів

Після часового аналізу реалізовано перехід до частотного подання. У відповідному режимі інтерфейс також відображає два графіки — спектр натурального сигналу та спектр сигналу моделі (рисунок 4.8). На відміну від осцилограм, де основна увага приділяється часовій формі коливань, спектральні графіки дозволяють оцінювати, наскільки добре чисельна модель відтворює частотну структуру реального процесу. Для задач валідації акустичних моделей це особливо важливо, оскільки саме у частотній області часто найкраще проявляються як корисна тональна складова, так і паразитні внески, пов'язані з шумом, чисельною дисперсією, граничними відбиттями або неідеальною постановкою експерименту.

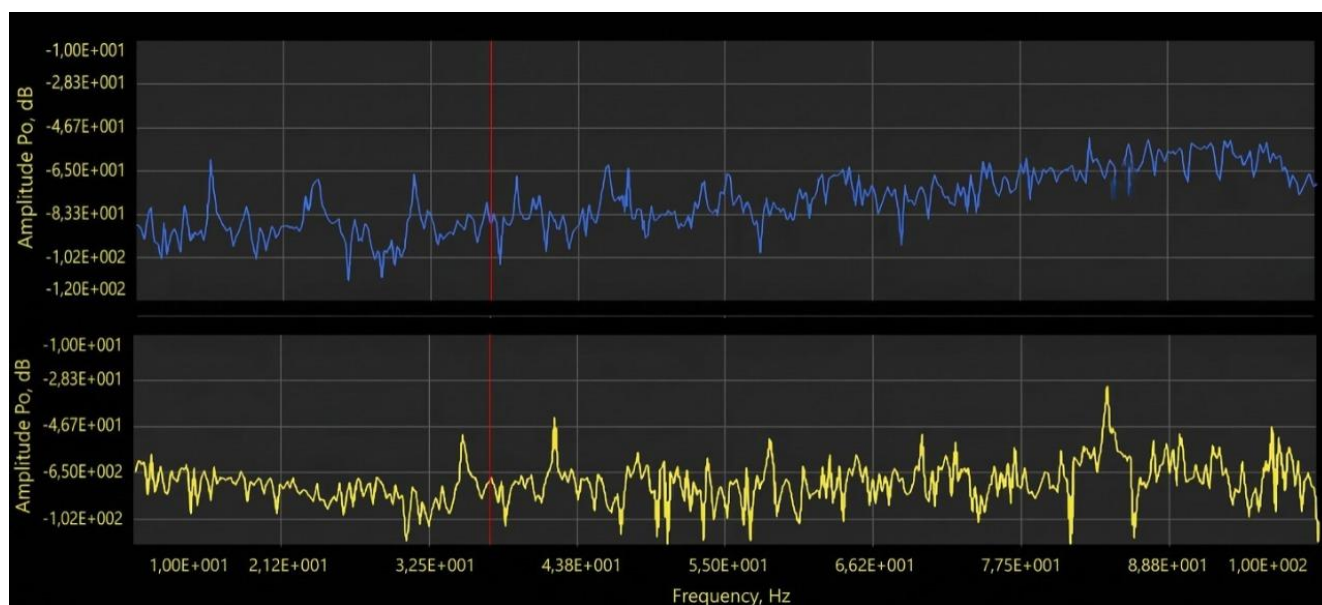


Рисунок 4.8 – Відображення спектральних представлень натурального та змодельованого сигналів

У реалізації спектрального режиму враховано, що коректність відображення спектра залежить від того, як саме було підготовлено сигнал перед перетворенням Фур'є. Тому в основу побудови покладено вже узгоджені часові фрагменти однакової довжини, для яких попередньо забезпечено однакові умови дискретизації. Це усуває типову проблему некоректного порівняння, коли спектри формально будуються для сигналів із різною частотою відліків або різною

тривалістю, а отже, мають різну частотну роздільність і не можуть бути безпосередньо співставлені. Завдяки цьому побудовані графіки відображають не артефакти різних форматів подання, а дійсні відмінності між натурним та модельним сигналом.

Спектральний режим дає змогу вирішити відразу кілька прикладних задач. По-перше, він дозволяє візуально підтвердити наявність енергетично вираженої компоненти на робочій частоті випромінювача. По-друге, на його основі можна встановити, чи відтворює модель не лише факт наявності цієї компоненти, а й співвідношення між основною складовою та сусідніми частотами. По-третє, спектральний графік дозволяє оцінити рівень фонового засмічення та побачити, чи не вносить модель додаткових небажаних піків, яких немає у натурних даних. Для практичної валідації це принципово, оскільки гарне співпадіння лише у часовій області ще не гарантує коректного відтворення частотної картини процесу.

Окремої уваги потребує той факт, що саме спектральне представлення є проміжною ланкою між загальним аналізом сигналу і формуванням ознак для статистичного порівняння. У межах реалізації воно не є лише допоміжною візуалізацією, а слугує робочим середовищем для вибору частоти, на якій далі здійснюється виділення корисної амплітудної складової. Тобто спектральний графік водночас виконує і контрольну, і операційну функцію: з одного боку, він дає можливість користувачу оцінити якість відтворення спектра, а з іншого — забезпечує основу для переходу до більш стійкого ознакового представлення.

Виділення амплітуди корисної складової на заданій частоті

Найбільш прикладно значущим режимом модуля є виділення амплітуди корисної складової для вибраної частоти. В інтерфейсі цей режим реалізовано як окрему вкладку, де користувач задає значення частоти, після чого для натурального і модельного сигналів відображаються відповідні залежності амплітуди цієї компоненти (рисунки 4.9). За суттю це означає перехід від повного спектрального опису до спеціально виділеної ознаки, яка безпосередньо пов'язана з фізично значущою складовою сигналу — частотою випромінювача або іншою контрольованою частотою аналізу. Доцільність такого режиму визначається тим,

що у натурних даних загальна спектральна картина зазвичай містить велику кількість другорядних компонент. Для розширення набору інформативних ознак у задачах валідації можуть використовуватися також часово-частотні представлення, зокрема wavelet-перетворення, які дають змогу локалізувати короточасні зміни спектрального складу сигналу [128]. Крім того, при формуванні стійких ознак для порівняння можуть використовуватися підходи адаптивної фільтрації, орієнтовані на пригнічення шумових компонент і стабілізацію інформативної складової сигналу [129]. Формування таких ознак відповідає загальним підходам сучасної теорії обробки та аналізу сигналів, у якій амплітудні, фазові та спектральні характеристики розглядаються як базові носії інформації про стан і структуру сигналу [130, 131]. Якщо оцінювати узгодженість моделі та експерименту за всім сигналом одразу, на результат можуть надмірно впливати шум, випадкові завади, локальні нерівномірності спектра або неінформативні фонові коливання. Виділення ж амплітуди на наперед визначеній корисній частоті дозволяє сфокусувати порівняння саме на тій складовій, яка має найбільше фізичне та методичне значення для задачі валідації.

У реалізованому програмному засобі цей підхід має подвійне призначення. По-перше, він спрощує інтерпретацію: замість аналізу всього спектра дослідник отримує концентровану характеристику, безпосередньо пов'язану з цільовою частотою. По-друге, він підвищує стійкість статистичної оцінки, оскільки метрики обчислюються не за зашумленим повним рядом, а за ознаками, що пройшли відбір на фізичну релевантність. Саме тому в задачах, де натурний сигнал містить широкосмуговий фон або нерегулярні збурення, режим виділення амплітуди на заданій частоті є значно інформативнішим за пряме порівняння сирих часових реалізацій.

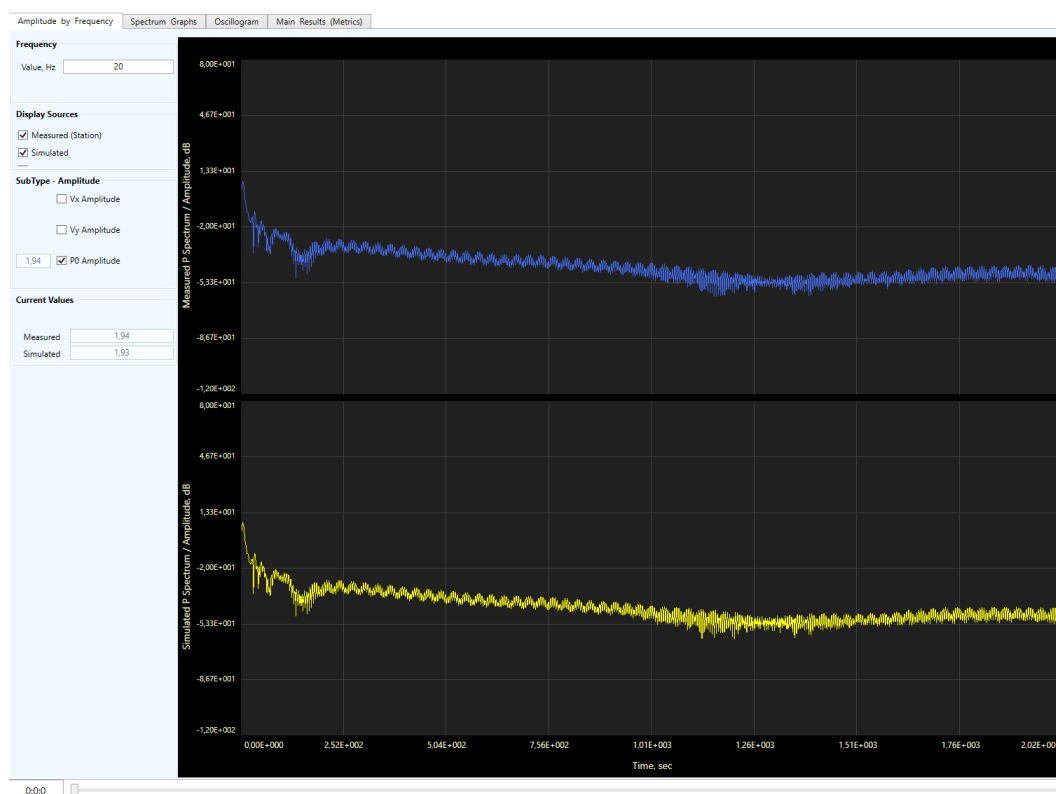


Рисунок 4.9 – Відображення результатів виділення амплітуди корисної складової на заданій частоті для натурального та змодельованого сигналів

Важливо, що у графічній формі користувач бачить окремо значення для натурних і модельних даних, а також може порівнювати їх у поточній точці аналізу. Це підвищує прозорість оцінювання: числова метрика вже не виникає як абстрактний результат “внутрішніх” розрахунків, а спирається на візуально доступні ряди ознак. Таким чином, програмний засіб забезпечує природний перехід від спектрального аналізу до статистичної оцінки без розриву між візуальною та числовою інтерпретацією.

Статистична оцінка узгодженості

Після формування часових, спектральних та ознакових представлень реалізовано обчислення статистичних показників узгодженості. Логіка цього етапу полягає в тому, що візуалізація, хоча і є необхідною, не забезпечує достатнього рівня об’єктивності для прийняття рішення щодо якості моделі. У задачах валідації потрібно мати числовий критерій, який дозволяє порівнювати різні конфігурації моделі між собою, визначати динаміку покращення або погіршення якості та надалі використовувати ці оцінки в автоматизованих процедурах відбору параметрів.

У межах реалізації статистичний модуль працює з даними, що вже пройшли попередню обробку і спектральне виділення. Це означає, що вхід до метрики є контрольованим і методично обґрунтованим: порівнюються не довільні “сирі” ряди, а сигнали або ознаки, приведені до спільної основи. Такий підхід зменшує чутливість до випадкових коливань, пов’язаних із відмінностями дискретизації, та знижує ризик хибної інтерпретації, коли погіршення метрики викликане не реальною невідповідністю моделі, а технічними особливостями представлення даних.

Отримані числові оцінки використовуються у двох напрямках. Перший — аналітичний: дослідник може інтерпретувати значення метрик разом із графічними представленнями і робити висновок про ступінь відповідності між натурним і модельним сигналом. Другий — алгоритмічний: ці самі значення стають вхідними даними для наступного модуля відбору конфігурацій, де точність розглядається вже не сама по собі, а разом із критеріями чисельної коректності та ресурсної здійсненності. Таким чином, статистична оцінка в реалізації виконує роль зв’язувальної ланки між етапом формування ознак та етапом автоматизованого визначення допустимої області параметрів моделі.

Представлення підсумкових метрик порівняння сигналів

Після виконання попередніх етапів оброблення сигналів, побудови осцилограм, спектральних представлень та виділення інформативних амплітудних ознак завершальним кроком у роботі розробленого програмного засобу є формування зведених числових результатів порівняння. Для реалізації цього етапу в інтерфейсі передбачено окрему вкладку Main Results (Metrics), призначену для інтегрованого подання основних кількісних показників, на підставі яких робиться висновок щодо ступеня відповідності між натурними даними та результатами моделювання. На відміну від попередніх вкладок, які в першу чергу орієнтовані на візуальне спостереження форми сигналу, його частотної структури та змін амплітуди на обраній частоті, ця вкладка виконує функцію узагальнення й числової інтерпретації результатів.

Необхідність виділення окремої вкладки для підсумкових метрик зумовлена тим, що в задачах валідації математичних моделей поширення акустичних хвиль простого візуального порівняння графіків недостатньо для обґрунтованого висновку. Навіть за наявності загальної подібності осцилограм або близького положення спектральних максимумів між натурним і змодельованим сигналами можуть зберігатися відмінності, які суттєво впливають на достовірність моделі. Зокрема, це можуть бути невеликі, але систематичні відхилення амплітуди, наявність локальних зсувів у часі, різниця в енергетичному розподілі за частотами або посилення шумових компонент. Саме тому програмний засіб має не лише відображати проміжні результати, а й формувати систему числових критеріїв, придатних для об'єктивного порівняння та подальшої інтерпретації.

У реалізованому інтерфейсі вкладка Main Results (Metrics) структурована у вигляді двох основних логічних блоків: Validation Metrics та FFT Analysis Results (рисунок 4.10). Такий поділ відповідає двом ключовим напрямом оцінювання узгодженості сигналів: аналізу у часовій області та аналізу у частотній області. Перший напрям дозволяє оцінити, наскільки форма змодельованого сигналу відтворює форму натурального сигналу у часовому представленні. Другий напрям дає змогу дослідити відповідність спектральної структури, зокрема положення основних гармонічних складових, співвідношення амплітуд та енергетичних характеристик. Поєднання цих двох блоків в одному інтерфейсі забезпечує цілісне уявлення про якість моделі та дозволяє уникнути однобічності оцінювання.

У блоці Validation Metrics подано метрики, що характеризують відмінність між сигналами у часовій області. До них належить, зокрема, Root Mean Square Error (RMSE), або середньоквадратична похибка, яка є однією з найбільш поширених узагальнених характеристик розбіжності між двома послідовностями відліків. Її використання дозволяє оцінити середній рівень похибки з підвищеною чутливістю до великих локальних відхилень. Це важливо у випадках, коли модель загалом відтворює сигнал коректно, але окремі ділянки містять суттєві розходження, які не повинні залишатися непоміченими.

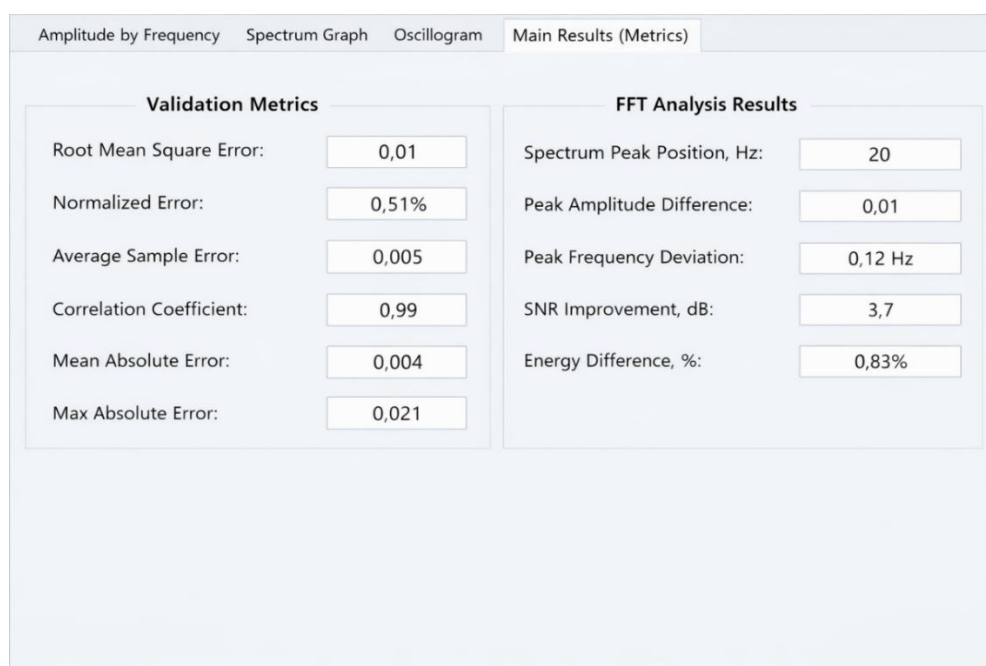


Рисунок 4.10 – Вкладка Main Results (Metrics) з відображенням підсумкових метрик порівняння натурних і змодельованих сигналів

Поряд із середньоквадратичною похибкою у вкладці відображається Normalized Error, тобто нормалізована похибка. Її застосування забезпечує можливість порівняння результатів для сигналів із різним абсолютним рівнем амплітуди. Якщо використовувати лише абсолютні значення похибок, то інтерпретація може бути спотвореною: одна й та сама різниця в одиницях амплітуди може мати різну значущість для сильних і слабких сигналів. Нормалізація усуває цю проблему й дозволяє інтерпретувати результат у відносному масштабі, що є особливо доцільним при порівнянні серій експериментів або різних конфігурацій моделі.

Додатково виводиться Average Sample Error, тобто середня похибка відліків. На відміну від середньоквадратичної похибки, ця метрика менш чутлива до поодиноких значних відхилень і краще відображає загальний середній рівень розбіжності між сигналами по всій довжині аналізованого фрагмента. Використання одночасно середньоквадратичної та середньої похибки дозволяє отримати більш збалансоване уявлення про характер відмінностей: перша сильніше реагує на аномально великі локальні похибки, а друга — на загальну систематичну невідповідність.

Важливою складовою набору часових показників є також коефіцієнт кореляції. На відміну від похибкових метрик, цей показник дає змогу оцінити не абсолютну різницю між відліками, а ступінь подібності форми двох сигналів. Високе значення коефіцієнта кореляції свідчить про те, що модельний сигнал добре відтворює загальну динаміку натурального сигналу, навіть якщо між ними існує певна амплітудна різниця. Для задач валідації це є суттєвим, оскільки інколи більш важливою є саме структурна подібність коливального процесу, ніж повний збіг кожного окремого відліку.

Окрім цього, у вкладці подаються Mean Absolute Error та Max Absolute Error. Перша з цих метрик характеризує середню абсолютну різницю між сигналами без піднесення до квадрата, а тому є інтерпретаційно простою та наочною. Друга фіксує найбільше локальне відхилення між натурним і змодельованим сигналами у межах аналізованого фрагмента. Саме максимальна абсолютна похибка дозволяє виявити критичні ділянки, де модель дає найбільше розходження з експериментом. У комплексі такі часові метрики забезпечують різноаспектне оцінювання: від середнього рівня похибки до фіксації найгіршого випадку невідповідності.

Другий логічний блок вкладки — FFT Analysis Results — реалізує представлення кількісних характеристик, отриманих у результаті спектрального аналізу. Його призначення полягає у перевірці того, наскільки коректно модель відтворює частотну структуру натурального сигналу. Для акустичних і, зокрема, гідроакустичних задач такий аналіз є принципово важливим, оскільки в багатьох випадках інформативними є не лише часові колювання, а й положення та амплітуди основних спектральних компонент, пов'язаних із фізичними параметрами джерела, середовища та приймальної системи.

Одним із ключових спектральних показників є Spectrum Peak Position, тобто положення основного максимуму спектра. Ця величина відображає частоту, на якій зосереджена найбільша енергія сигналу. Якщо математична модель побудована коректно й параметризована належним чином, то положення основного спектрального піка для модельного сигналу має узгоджуватися з відповідним максимумом у натурних даних. Значне зміщення цієї величини може свідчити про

невідповідність параметрів моделі, неточність дискретизації, некоректне відтворення джерела сигналу або ж недостатню якість попереднього узгодження даних.

Наступний показник — Peak Amplitude Difference — характеризує різницю між амплітудами основних спектральних максимумів натурального та модельного сигналів. На практиці ця величина дозволяє оцінити, наскільки коректно відтворено інтенсивність домінантної частотної складової. Якщо модель коректно визначає частоту основного піка, але при цьому суттєво завищує або занижує його амплітуду, це також є ознакою неповної відповідності між моделлю та натурними вимірюваннями. Саме тому одночасний контроль положення та амплітуди спектрального максимуму є більш інформативним, ніж аналіз лише однієї з цих величин.

У вкладці також подається Peak Frequency Deviation, тобто відхилення частоти піка. Ця характеристика дозволяє кількісно виразити різницю між положенням основної спектральної складової в натурних даних і в моделі. На відміну від простого відображення значення частоти максимуму, наявність окремої метрики відхилення спрощує інтерпретацію, особливо у випадках порівняння кількох серій експериментів. Замість аналізу двох абсолютних значень дослідник одразу отримує кількісну оцінку різниці, що може бути безпосередньо використана у процедурі прийняття рішення щодо точності моделі.

Важливим з точки зору якості виділення корисної складової є показник SNR Improvement, тобто покращення співвідношення сигнал/шум. Його присутність у підсумковій вкладці відображає той факт, що в розробленому програмному засобі враховується не лише формальне порівняння двох кривих, а й якість виділення інформативної компоненти на фоні завад. Для натурних гідроакустичних даних, у яких часто присутні шумові домішки, фонові коливання та сторонні збурення, цей параметр є суттєвим. Він дозволяє оцінити, наскільки ефективно попередня обробка і подальше спектральне представлення сприяли виділенню корисного сигналу для наступного порівняння з модельним результатом.

Ще однією спектральною характеристикою є Energy Difference, тобто відносна різниця енергії сигналів. Вона має особливе значення у тих випадках, коли важливо оцінити не лише точкові збіги піків або середні похибки, а узагальнену подібність енергетичного вмісту сигналів. Якщо модель правильно відтворює загальну фізичну картину процесу, то енергія змодельованого сигналу повинна бути близькою до енергії натурного. Водночас ця метрика є більш інтегральною і менше залежить від окремих локальних аномалій, ніж деякі інші показники.

Таким чином, вкладка Main Results (Metrics) виконує роль підсумкового аналітичного центру всієї програмної системи. Вона об'єднує результати, отримані на попередніх етапах оброблення, і переводить їх у форму, придатну для формального порівняння та інтерпретації. Завдяки наявності як часових, так і спектральних показників користувач отримує можливість оцінити якість моделі комплексно, а не за одним окремим критерієм. Це особливо важливо для валідації математичних моделей поширення акустичних хвиль, де реальна відповідність між натурним і змодельованим сигналом може проявлятися по-різному: через форму осцилограми, через відтворення домінантної частоти, через збіг амплітудних характеристик або через близькість інтегральних енергетичних параметрів.

Слід окремо зазначити, що подання результатів саме в такому таблично-параметричному вигляді є важливим не лише для зручності користувача, а й для забезпечення відтворюваності дослідження. Фіксація числових значень метрик у стандартизованому форматі дозволяє порівнювати різні прогони моделі, аналізувати вплив зміни параметрів дискретизації або постановки задачі, а також формувати базу даних результатів для подальшого статистичного аналізу. Іншими словами, ця вкладка є не просто візуальним підсумком одного конкретного сеансу роботи, а елементом програмного інструментарію, що підтримує систематичне дослідження точності чисельної моделі.

4.6. Реалізація модуля відбору конфігурацій та формування області допустимих параметрів

Після завершення серії обчислювальних експериментів, у межах яких для кожної конфігурації моделі визначаються показники точності та ресурсної вартості, у розробленому програмному засобі формується окрема вкладка, призначена для аналізу результатів відбору конфігурацій (рисунок 4.11). Ця вкладка є завершальним елементом модуля відбору параметрів і відображає множину допустимих конфігурацій, що пройшли перевірку за заданими критеріями. Її поява після закінчення обчислень відображає логіку запропонованого підходу: спочатку здійснюється серійний прогін моделей у вибраному параметричному просторі, далі для кожної конфігурації обчислюються метрики точності, а після цього виконується відбір допустимих варіантів з урахуванням ресурсного критерію. Саме на цьому етапі користувач отримує не окремі ізольовані результати, а впорядковане представлення області параметрів, у межах якої модель може вважатися придатною для подальшого використання.

Amplitude by Frequency Spectrum Graph Oscillogram Main Results (Metrics) Config Selection									
Resources		Candidate Configurations							
Select resource:		Mode	PPW	Step size dx, m	PML size	PML alpha	Lambda reserv λ	Nx	Ny
☒ Time ☐ RAM		Maximum parameters	20	1,530612	10	2.0	0,50	48	1456
Optimize		Optimal parameters	3.061224	10	2.0	0,50	48	1456	141.40
		Optimal parameters	3.061224	10	2.0	0,50	32	728	47.82
		Optimal parameters	3.061224	10	2.0	0,50	32	728	47.82
		Optimal parameters	3.061224	10	2.0	0,50	32	728	47.82
		Optimal parameters	3.061224	10	2.0	0,50	32	728	47.82
		Optimal parameters	3.061224	10	2.0	0,25	32	728	47.82
		Optimal parameters	3.061224	10	2.0	0,50	32	728	68.02
		Optimal parameters	3.061224	10	2.0	0,25	32	728	62.02
		Optimal parameters	3.061224	10	1.0	0,25	32	728	66.02
		Optimal parameters	3.061224	8	1.0	0,50	32	728	62.02
		Optimal parameters	3.061224	13	1.0	0,25	32	728	68.02
		Optimal parameters	3.061224	10	0.5	0,25	32	728	68.02
		Optimal parameters	3.061224	10	1.0	0,25	32	728	62.02
		Maximum parameters (validation)	1,530612	10	2.0	0,25	48	1456	102.94

Рисунок 4.11 – Вкладка відбору конфігурацій після завершення обчислень

Як видно з інтерфейсу, вікно поділено на дві функціонально різні частини. Ліва частина призначена для вибору ресурсу, який розглядається як обмежувальний під час формування допустимої області параметрів. У поточній реалізації передбачено два варіанти: Time та RAM. Це означає, що користувач може задати,

який саме тип обчислювальних витрат є пріоритетним у конкретній прикладній постановці. Якщо обирається режим Time, модуль орієнтується на мінімізацію часу моделювання за умови дотримання необхідної точності та чисельної коректності. Якщо ж обирається режим RAM, пріоритетним стає обмеження використання оперативної пам'яті. Такий підхід є принципово важливим, оскільки в задачах чисельного моделювання поширення акустичних хвиль обчислювальні ресурси можуть бути лімітовані по-різному залежно від типу апаратної платформи, характеру дослідження та режиму використання програмного засобу.

Наявність окремого блоку Resources відображає закладену в методі ідею багатокритеріального відбору конфігурацій. На відміну від підходів, у яких оптимізація параметрів виконується лише за одним показником похибки, у запропонованому рішенні точність розглядається у поєднанні з ресурсною здійсненністю. Це означає, що конфігурація не повинна лише забезпечувати прийнятне значення метрики узгодженості між натурними та змодельованими даними, але й бути обчислювально доцільною. Саме тому користувачеві надається можливість явно вказати, яке ресурсне обмеження у даному випадку є визначальним. У дисертаційному контексті це безпосередньо пов'язано з формуванням області допустимих параметрів, оскільки допустимість конфігурації визначається не лише її фізичною або чисельною коректністю, а й можливістю практичного виконання розрахунків на наявних обчислювальних засобах.

Після вибору відповідного ресурсу та запуску процедури відбору основна інформація відображається у правій частині вкладки у вигляді таблиці конфігурацій. Ця таблиця є ключовим елементом інтерфейсу, оскільки саме вона візуалізує результат формування множини допустимих параметрів. Її перший рядок містить конфігурацію, що відповідає режиму Maximum parameters. У цьому випадку йдеться про конфігурацію з максимально деталізованими параметрами моделі, яка використовується як верхня межа досліджуваного параметричного простору або як референтна постановка для подальшого зіставлення. Така конфігурація, як правило, характеризується найбільшою точністю відтворення процесу, але одночасно є і найбільш витратною за часом або пам'яттю. Її

відображення в таблиці на першій позиції має важливе методичне значення, оскільки дозволяє користувачеві бачити вихідну «еталонну» постановку, від якої далі здійснюється перехід до більш економних конфігурацій.

Нижче у таблиці подано множину конфігурацій, позначених як *Optimal parameters*. Це не одна єдина конфігурація, а набір допустимих варіантів, що відповідають умовам відбору. Саме це є важливим результатом роботи модуля: замість жорсткого нав'язування одного «найкращого» набору параметрів користувачу пропонується область допустимих конфігурацій, у межах якої можна вибрати рішення залежно від додаткових міркувань. Такий підхід краще відповідає реальним умовам інженерного застосування, де остаточний вибір параметрів часто залежить від зовнішніх факторів: наявних обчислювальних ресурсів, необхідної швидкості отримання результату, вимог до стабільності повторних прогонів або потреб подальшої серійної обробки даних. Отже, інтерфейс не лише показує, які конфігурації є формально придатними, а й створює основу для гнучкого прийняття рішення.

Структура таблиці побудована таким чином, щоб користувач міг одночасно оцінити як параметри чисельної постановки, так і відповідні ресурсні характеристики. У ній, зокрема, подано показники PPW, крок сітки, параметри PML, запас у довжинах хвилі, розміри обчислювальної сітки, а також час моделювання. Такий склад стовпців є не випадковим: він відображає саме ті параметри, які в межах запропонованого методу розглядаються як керовані фактори, що впливають одночасно і на точність, і на ресурсоемність моделі. Показник PPW характеризує дискретизацію хвильового процесу і безпосередньо впливає на чисельну точність. Крок сітки визначає просторову деталізацію розрахунку. Параметри PML впливають на ефективність поглинання хвиль на межах розрахункової області та, відповідно, на рівень чисельних артефактів. Розміри сітки і кількість вузлів безпосередньо пов'язані з обсягом пам'яті та тривалістю обчислень. Таким чином, таблиця не просто перераховує технічні характеристики окремих запусків, а показує взаємозв'язок між вибором параметрів моделі та практичними наслідками цього вибору.

Окремої уваги заслуговує те, що в таблиці зібрано саме результати вже відібраних конфігурацій, а не всіх прогонів без винятку. Це означає, що перед відображенням даних програмний засіб виконує внутрішню процедуру фільтрації. На цьому етапі з початкової множини конфігурацій відкидаються ті варіанти, які не задовольняють обмеженням за точністю, чисельною коректністю або ресурсною здійсненністю. Унаслідок цього користувач бачить не перевантажений набір усіх можливих комбінацій параметрів, а вже підготовлену множину рішень, придатних для подальшого розгляду. Це суттєво підвищує практичну цінність модуля, оскільки зменшує обсяг ручного аналізу та дозволяє перейти від масиву проміжних результатів до осмисленого простору допустимих конфігурацій.

З методичної точки зору така реалізація інтерфейсу є важливою, оскільки вона наочно демонструє, що результатом роботи модуля є не одна-єдина точка в параметричному просторі, а область допустимих значень. Саме це узгоджується з формулюванням наукового результату, де йдеться не просто про визначення параметрів моделі, а про визначення параметрів і області їх значень, що забезпечують потрібну точність за встановленими метриками при дотриманні вимог чисельної коректності та ресурсної здійсненності. Табличне подання дає змогу побачити цю область в операційній формі: як множину конкретних конфігурацій, кожна з яких може бути використана на практиці.

Крім того, реалізований інтерфейс виконує ще одну важливу функцію — він забезпечує відтворюваність процесу вибору. Оскільки всі конфігурації відображаються у стандартизованому форматі з однаковим набором параметрів, результати різних серій експериментів можуть бути безпосередньо порівняні між собою. Це є важливим не лише для практичного використання програмного засобу, а й для наукового аналізу, зокрема при дослідженні чутливості моделі до зміни параметрів дискретизації, граничних умов або допустимого рівня ресурсних витрат. У такому сенсі вкладка відбору конфігурацій виступає не тільки елементом інтерфейсу користувача, а й інструментом документування та аналізу результатів.

Слід підкреслити, що поєднання блоку вибору ресурсу з таблицею допустимих конфігурацій забезпечує прозорий механізм прийняття рішення.

Користувач бачить, який саме ресурс було покладено в основу відбору, і водночас отримує перелік конфігурацій, які відповідають вибраному критерію. Це робить процедуру формування допустимої області параметрів не «закритою» внутрішньою операцією програми, а інтерпретованим і контрольованим процесом. Така властивість є особливо важливою у валідаційних задачах, де будь-яке рішення щодо прийнятності або неприйнятності конфігурації має бути аргументованим і відтворюваним.

4.7. Демонстрація результатів роботи та оцінка ефективності створеного методу

У цьому підрозділі наведено результати практичної демонстрації роботи створеного методу на серії з восьми експериментів, у межах яких виконувалося порівняння змодельованих та натурних акустичних даних. Основною метою такого аналізу є оцінювання того, наскільки результати чисельного моделювання узгоджуються з реальними вимірюваннями, а також виявлення характеру можливих відмінностей між ними в часовій, спектральній та інтегральній формах подання.

Усі сигнали, що використовувалися в дослідженні, були попередньо підготовлені, синхронізовані та приведені до зіставного вигляду. Тому в межах цього етапу увага зосереджується не на процедурі попереднього вирівнювання чи очищення даних, а безпосередньо на оцінюванні ступеня відповідності між змодельованими та натурними даними. Саме це дозволяє продемонструвати практичну ефективність створеного методу валідації, орієнтованого на поєднання наочних графічних засобів аналізу з формалізованими числовими показниками.

Серія експериментів була організована так, щоб показати вплив одного з важливих параметрів чисельного розрахунку — кроку сітки — на якість узгодження між змодельованими та натурними даними. При цьому перші чотири експерименти відповідають розрахункам із кроком сітки 2 м, а наступні чотири експерименти — розрахункам із кроком сітки 4 м. Такий поділ дозволяє простежити, яким чином зміна просторової дискретизації впливає на часову форму сигналу, спектральний

розподіл енергії, поведінку вибраної частотної складової та на підсумкові числові метрики відповідності.

Для всіх восьми експериментів використовувався єдиний підхід до обробки результатів, що забезпечує коректність їх взаємного порівняння. Зокрема, для аналізу застосовувалась частота дискретизації 2048 Гц, спектральні характеристики обчислювалися з кроком по частоті 1/32 Гц, а спектральні графіки відображалися в діапазоні до 138 Гц. На осцилограмах подавалися часові реалізації змодельованого і натурального сигналів, на графіках спектру – усереднені за весь час спектри цих сигналів, на графіках амплітуди за частотою – зміна амплітуди на вибраній частоті 21 Гц, а у вікні метрик – числові показники, що кількісно характеризують ступінь близькості між змодельованими та натурними даними.

Обраний формат подання результатів дозволяє оцінювати ефективність створеного методу одразу з кількох позицій. По-перше, часові графіки дають змогу візуально встановити подібність форми сигналів та характеру їхніх коливань. По-друге, спектральні графіки дозволяють оцінити, наскільки коректно модель відтворює частотну структуру натурального процесу, зокрема положення домінантних компонент. По-третє, аналіз амплітуди на вибраній частоті дозволяє окремо простежити поведінку найбільш важливої для дослідження спектральної складової. По-четверте, числові метрики забезпечують формалізовану та відтворювану оцінку похибки, кореляції, енергетичних відмінностей та інших характеристик, необхідних для обґрунтованого висновку щодо адекватності моделі.

Отже, далі результати наведено послідовно для кожного з восьми експериментів, причому для кожного дослідження подаються чотири ілюстрації: осцилограми, усереднені спектри, графік амплітуди на вибраній частоті та вікно з обчисленими метриками. Така структура викладу дозволяє поетапно показати, яким чином створений метод виявляє як випадки високої відповідності між змодельованими та натурними даними, так і ситуації, у яких розбіжності між ними стають суттєвими.

У першому експерименті наведено результати порівняння змодельованого та натурального сигналів. Уже на рівні часових реалізацій видно, що модель достатньо

точно відтворює основну форму натурального сигналу. Характер зміни амплітуди, положення основних коливань і загальна структура часового процесу для обох сигналів є близькими, що вказує на добру узгодженість між модельними та експериментальними даними. Осцилограму для результатів першого експерименту наведено на рисунку 4.12.

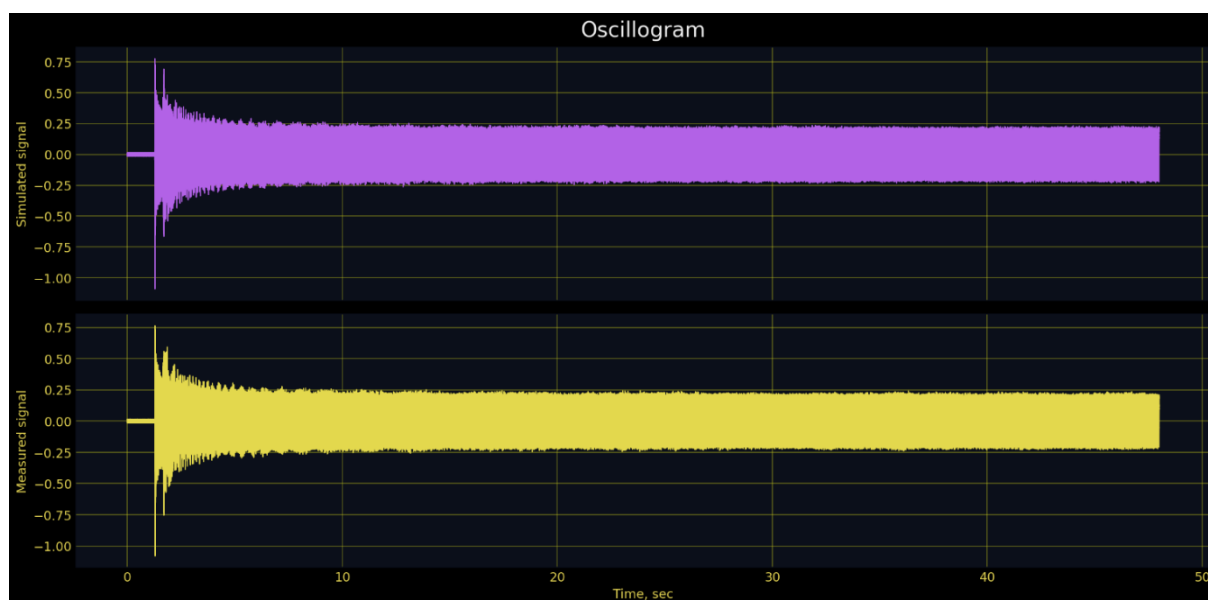


Рисунок 4.12 – Осцилограми змодельованих і натурних даних для експерименту 1

Усереднений спектральний аналіз підтверджує цей висновок. Для обох сигналів домінантна спектральна компонента локалізується на частоті 21 Гц (рисунок 4.13), тобто в області очікуваної робочої частоти. Важливо, що для цього дослідження не спостерігається зсуву положення спектрального максимуму між змодельованими і натурними даними, а відмінність у величині пікової амплітуди є дуже малою. Це свідчить про те, що модель коректно відтворює не лише часову форму сигналу, а й його основну частотну структуру. Додатково це означає, що програмна реалізація процедур підготовки, фільтрації та спектрального оцінювання не вносить суттєвих спотворень у положення основної інформативної компоненти сигналу. Отже, отримані результати підтверджують придатність використаного підходу для валідації моделі за спектральними ознаками, оскільки збіг частоти максимуму є важливою ознакою фізичної узгодженості модельного та натурального сигналів.

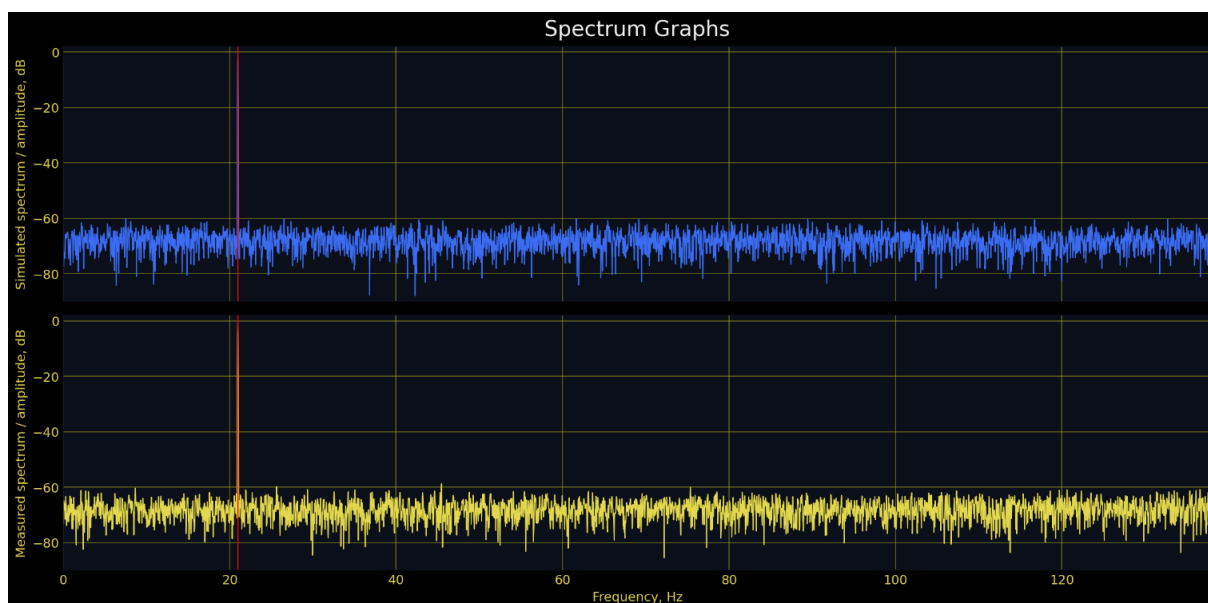


Рисунок 4.13 – Усереднені спектри змодельованих і натурних даних для експерименту 1

На рисунку 4.14 зображено графік, побудований для вибраної частоти 21 Гц, також демонструє високу близькість двох кривих упродовж усього інтервалу спостереження. Це означає, що розроблений метод дає змогу не лише порівнювати сигнали в цілому, а й окремо оцінювати поведінку фізично значущої частотної складової в часі. Відсутність помітного розходження між кривими на частоті 21 Гц підтверджує, що модель коректно відтворює часову динаміку основної інформативної компоненти сигналу. Такий результат є важливим для валідації, оскільки засвідчує узгодженість між натурними та змодельованими даними не лише за інтегральними метриками, а й на рівні відстеження цільової частотної складової в часі.

Крім того, збіг амплітудних характеристик на вибраній частоті свідчить про правильність попередніх етапів узгодження даних, зокрема ресемплінгу, віконної обробки та спектрального виділення корисної компоненти. Отриманий результат показує, що запропонований підхід зберігає фізичний зміст сигналу під час переходу від часового представлення до частотного аналізу і не вносить помітних додаткових спотворень. Це особливо важливо для задач валідації гідроакустичних моделей, де навіть незначне зміщення амплітуди або фази на цільовій частоті може призвести до хибної інтерпретації якості моделі.

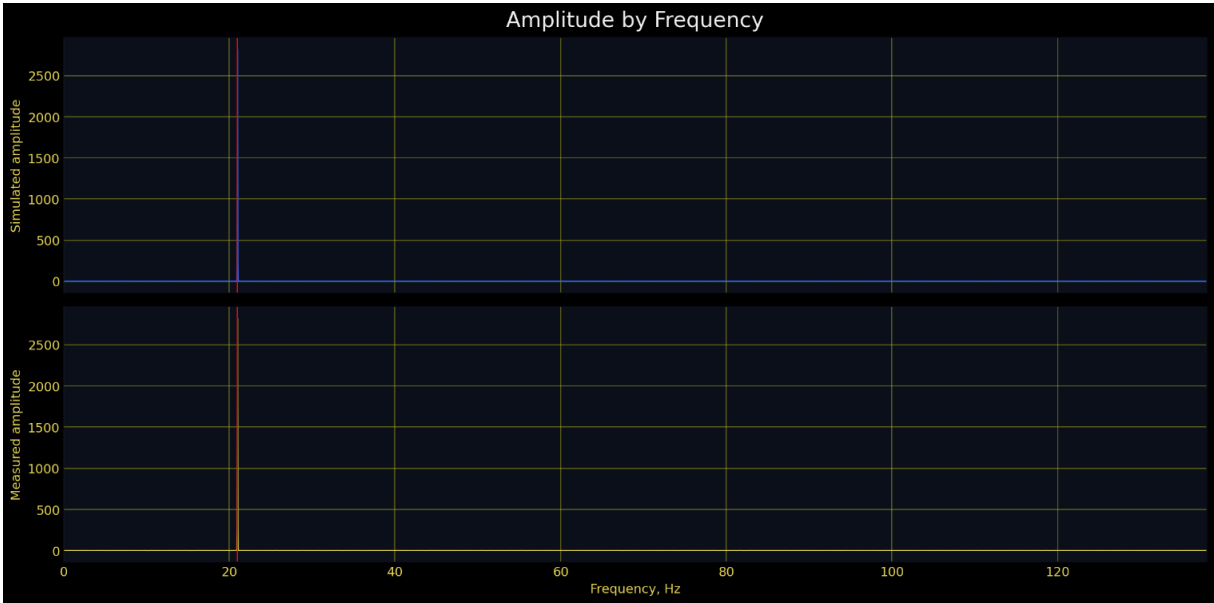


Рисунок 4.14 – Зміна амплітуди на виділеній частоті 21 Гц для експерименту 1

Як показує рисунок 4.15, числові результати підтверджують якісний висновок. Для цього експерименту отримано: $RMSE = 0,002538$, середня нормована похибка = 0,25 %, $MAE = 0,002049$, коефіцієнт кореляції = 0,999848, максимальна абсолютна похибка = 0,006278. Положення спектрального піка для обох сигналів становить 21,00 Гц, а різниця енергії дорівнює лише 0,125 %.

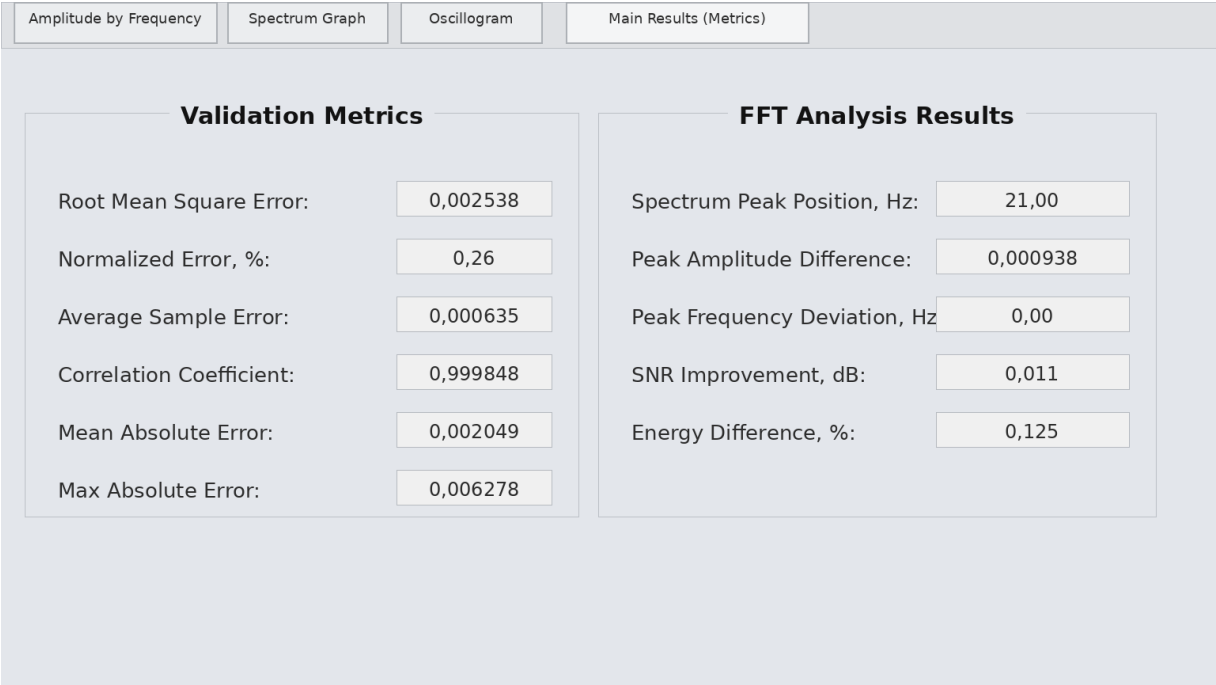


Рисунок 4.15 – Результати кількісного оцінювання відповідності змодельованих і натурних даних для експерименту 1

Сукупність цих результатів свідчить про дуже високий ступінь відповідності між моделлю та натурними даними, а отже — про ефективність запропонованого методу валідації для даного випадку.

Другий експеримент також демонструє високий рівень узгодженості між сигналом, отриманим у результаті моделювання, та натурним сигналом. Осцилограми показують, що часові реалізації мають близьку форму, а характер зміни амплітуди добре відтворюється моделлю на всьому інтервалі аналізу (рисунок 4.16). Візуально не спостерігається істотних розходжень, які могли б свідчити про серйозні фазові або амплітудні спотворення.

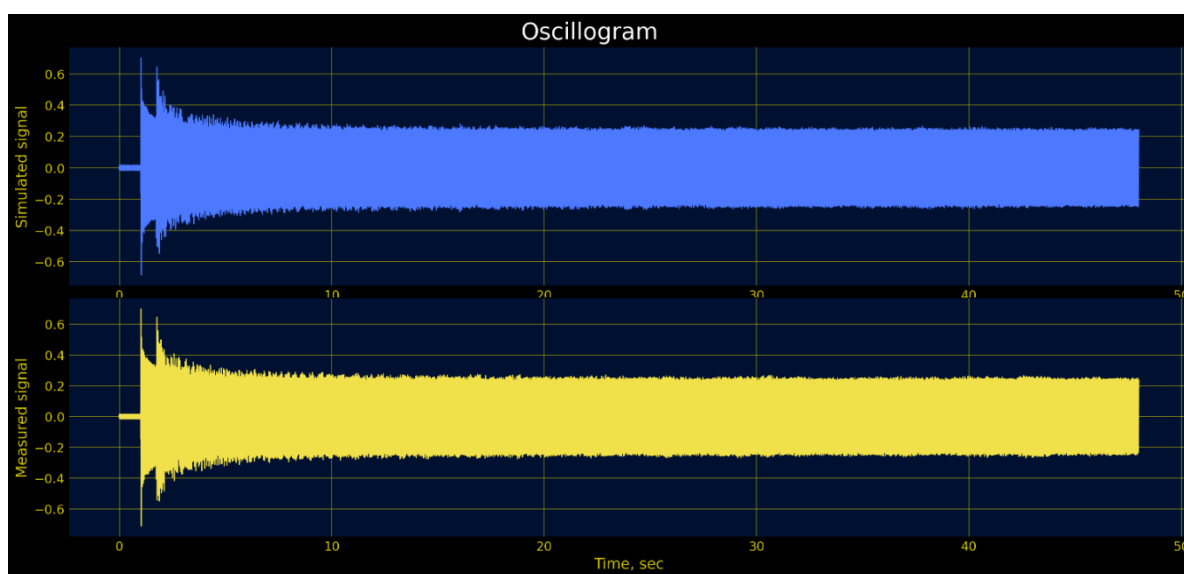


Рисунок 4.16 – Осцилограми змодельованих і натурних даних для експерименту 2

Спектральний аналіз, як і в попередньому випадку, показує, що домінантний максимум для обох сигналів розташований на частоті 21 Гц (рисунок 4.17). Це є важливим результатом, оскільки підтверджує правильне відтворення головної частотної складової. Незважаючи на дуже незначні відмінності в амплітуді спектрального піка, в цілому розподіл спектральної енергії для змодельованого та натурального сигналів є дуже близьким. Це, у свою чергу, свідчить про коректність налаштування моделі щодо відтворення частотних характеристик досліджуваного сигналу. Важливо також, що відсутність помітного зміщення спектрального максимуму підтверджує узгодженість між чисельним моделюванням і натурними вимірюваннями на рівні основної інформативної складової. У підсумку це дає

підстави вважати, що обрана конфігурація забезпечує не лише прийнятну часову, а й достатню спектральну точність відтворення сигналу.

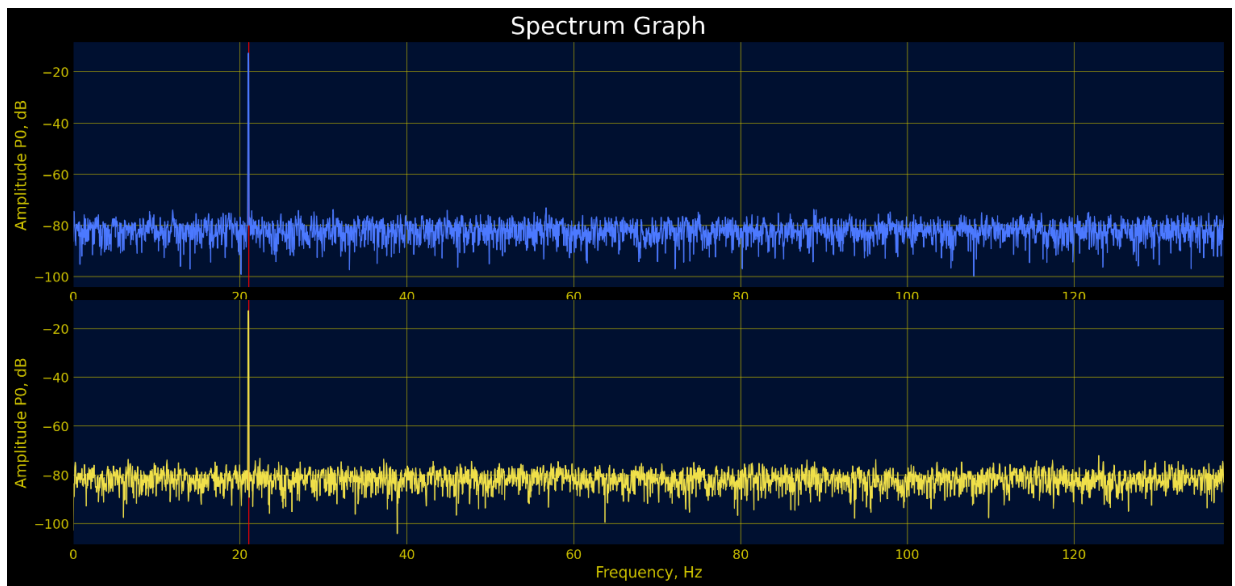


Рисунок 4.17– Усереднені спектри змодельованих і натурних даних для експерименту 2

На графіку амплітуди (рисунок 4.18) на вибраній частоті видно, що амплітудна поведінка сигналів у часі практично збігається. Це означає, що не лише середній спектральний склад, а й часове відпрацювання саме вибраної частотної компоненти моделлю є коректним.

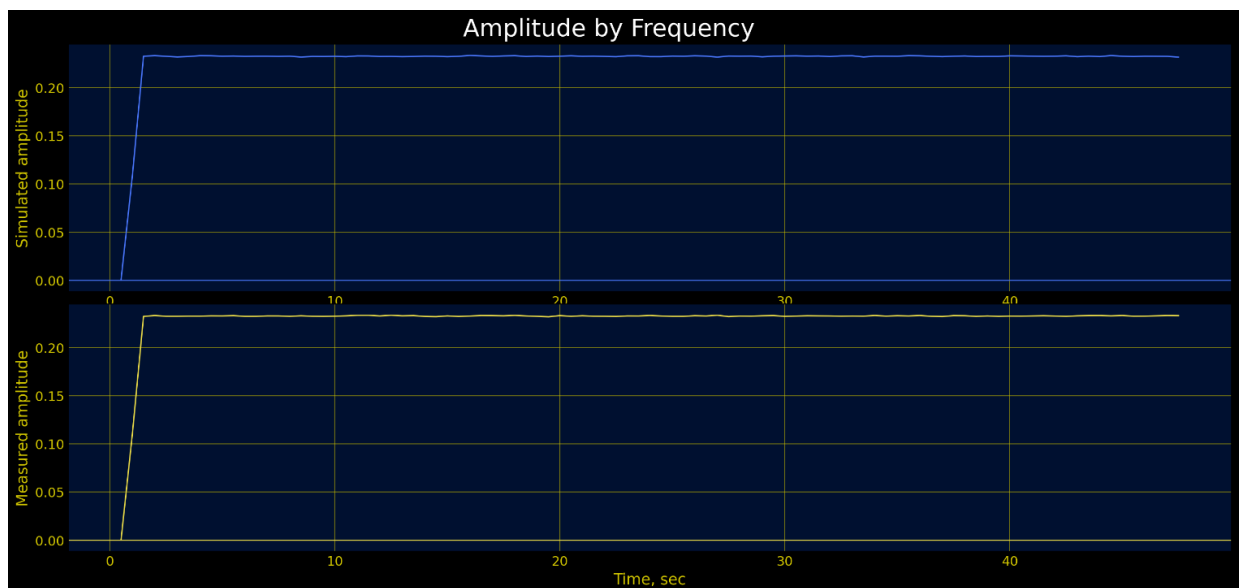


Рисунок 4.18 – Зміна амплітуди на виділеній частоті 21 Гц для експерименту 2

Числові метрики для другого експерименту (рисунок 4.19) становлять: $RMSE = 0,002474$, середня нормована похибка = 0,25 %, $MAE = 0,001882$, коефіцієнт

кореляції = 0,999809, максимальна абсолютна похибка = 0,008149. Положення піка знову збігається і дорівнює 21,00 Гц, а різниця енергії між сигналами становить 0,205 %.

Validation Metrics		FFT Analysis Results	
Root Mean Square Error:	0,002474	Spectrum Peak Position, Hz	21,00
Normalized Error:	0,25%	Peak Amplitude Difference	0,000205
Average Sample Error:	-0,001036	Peak Frequency Deviation, Hz	0,00
Correlation Coefficient:	0,999809	SNR Improvement, dB:	-0,142
Mean Absolute Error:	0,001882	Energy Difference, %:	0,205%
Max Absolute Error:	0,008149		

Рисунок 4.19 – Результати кількісного оцінювання відповідності змодельованих і натурних даних для експерименту 1

Таким чином, другий експеримент підтверджує, що за кроку сітки 2 запропонований метод фіксує дуже високий ступінь збігу між розрахунковими та натурними даними.

Третій експеримент є показовим прикладом того, що створений метод валідації дозволяє виявляти не лише добрі, а й послаблені випадки відповідності між модельними та натурними даними. На часових графіках видно (рисунок 4.20), що загальна форма сигналів залишається подібною, однак збіг уже не є таким високим, як у двох попередніх дослідах. Відмінності стають помітнішими насамперед на рівні локальної амплітудної поведінки.

Це свідчить про те, що в даному експерименті модель відтворює основну тенденцію зміни сигналу, проте вже не забезпечує такого самого рівня точності в деталях, як у попередніх випадках. Саме тому третій експеримент можна розглядати як приклад граничної зони прийнятної відповідності, коли модель

залишається інформативною, але потребує уважнішої кількісної оцінки за метриками.

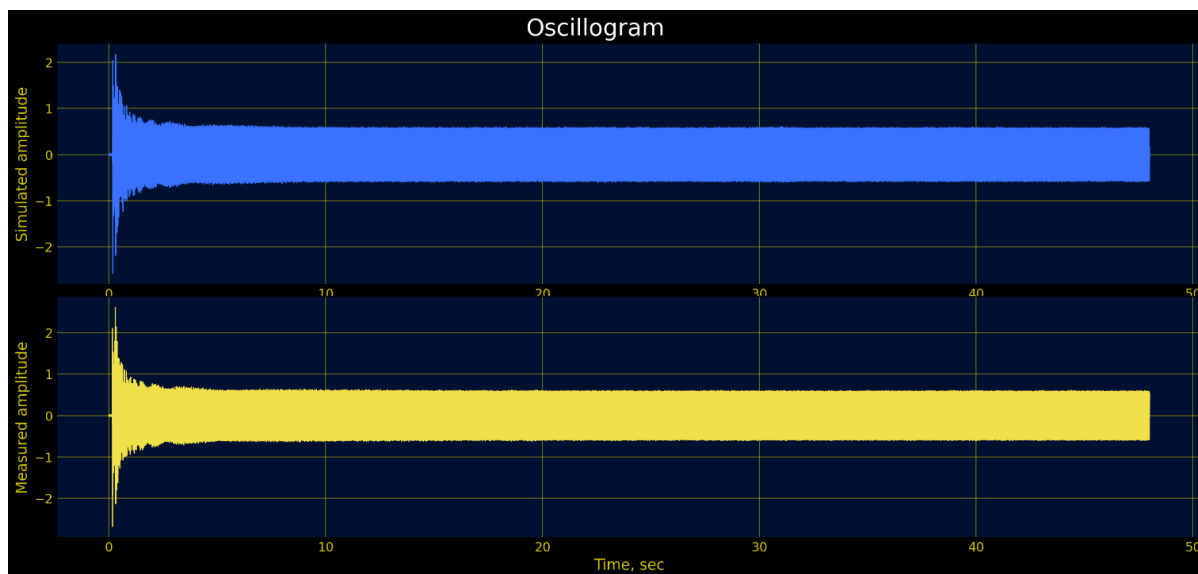


Рисунок 4.20 – Осцилограми змодельованих і натурних даних для експерименту 3

У спектральній області при цьому головна частотна складова все ще правильно локалізується на 21,00 Гц як для змодельованого, так і для натурального сигналу (рисунок 4.21). Отже, положення основної частоти модель відтворює коректно.

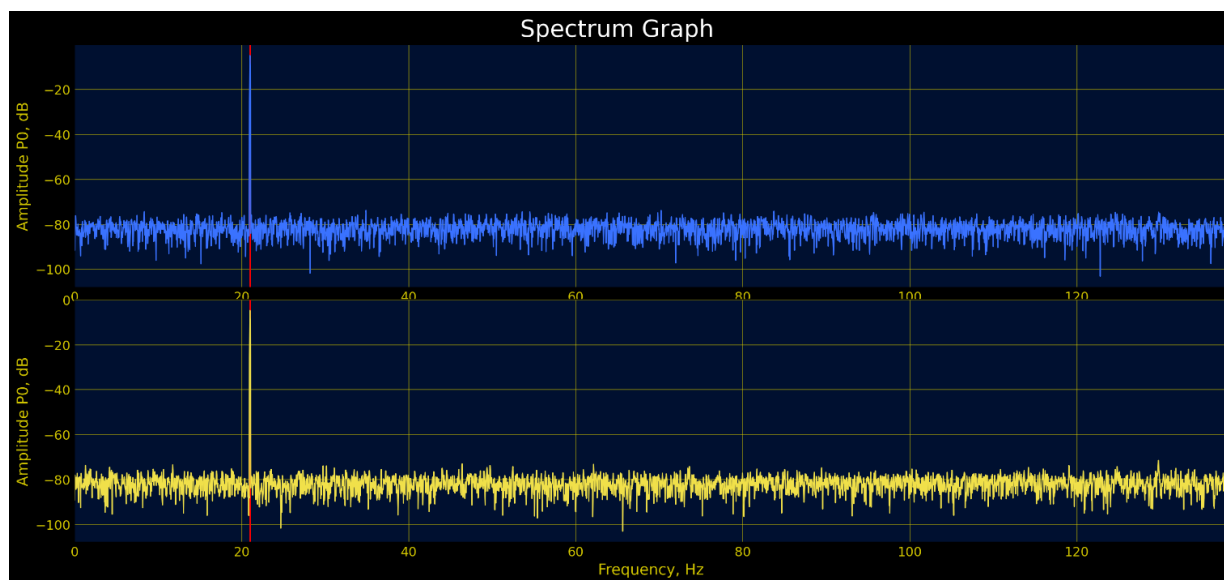


Рисунок 4.21 – Усереднені спектри змодельованих і натурних даних для експерименту 3

Водночас на графіку амплітуди на вибраній частоті (рисунок 4.22) вже видно, що часове відтворення цієї складової не є настільки точним, як у попередніх прикладах: криві не повторюють одна одну з тією самою щільністю.

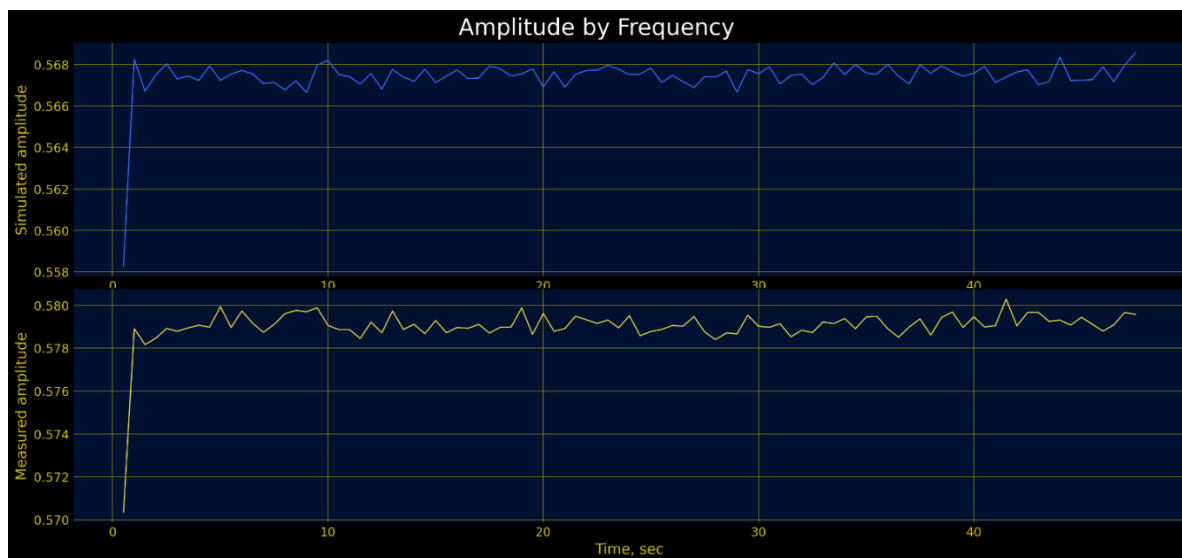


Рисунок 4.22 – Зміна амплітуди на виділеній частоті 21 Гц для експерименту 3

Числові метрики добре відображають це погіршення узгодженості (рисунок 4.23). Для третього експерименту отримано: RMSE = 0,020015, середня нормована похибка = 2,00 %, MAE = 0,019995, коефіцієнт кореляції = 0,860452, максимальна абсолютна похибка = 0,022483. Хоча положення спектрального піка залишається правильним і дорівнює 21,00 Гц, різниця енергії між сигналами зростає до 3,968 %.

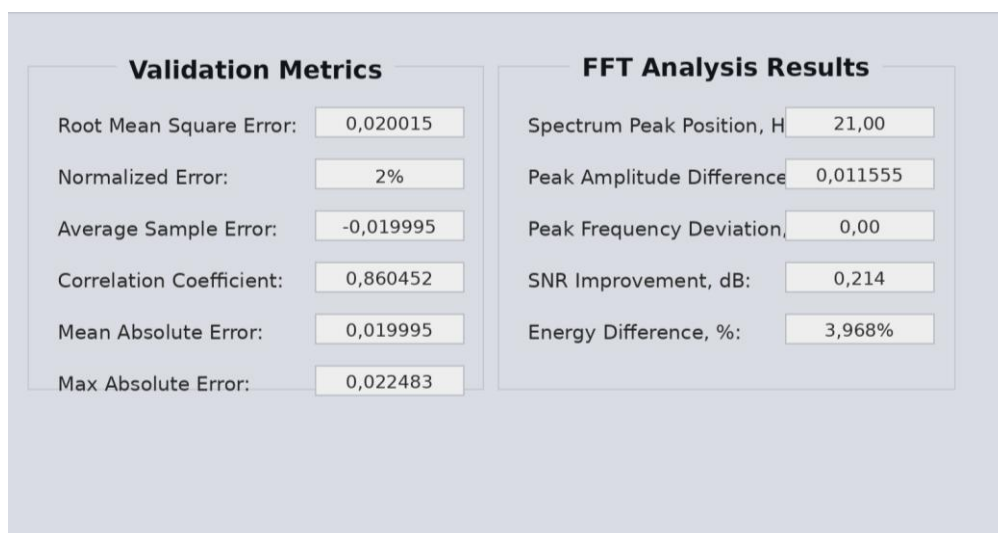


Рисунок 4.23 – Результати кількісного оцінювання відповідності змодельованих і натурних даних для експерименту 1

Таким чином, цей приклад демонструє, що навіть за формально правильного відтворення основної частоти модель може мати гіршу часову узгодженість із натурним сигналом, і саме це коректно виявляє створений метод.

Четвертий експеримент завершує групу дослідів, виконаних із кроком сітки 2. Осцилограми (рисунок 4.24) свідчать про достатньо високий рівень відповідності між змодельованим і натурним сигналами. Візуально зберігається близькість загальної форми процесу, а характер зміни амплітуди відтворюється без різких розходжень. Це дає підстави попередньо оцінювати дану конфігурацію як таку, що забезпечує прийнятну якість відтворення часової структури сигналу. Важливо, що навіть на рівні візуального аналізу не спостерігається істотних локальних відхилень, які могли б свідчити про втрату стійкості моделі або появу виражених спотворень. Отже, четвертий експеримент підтверджує, що для обраних параметрів дискретизації модель зберігає здатність коректно відображати основні особливості натурального процесу.

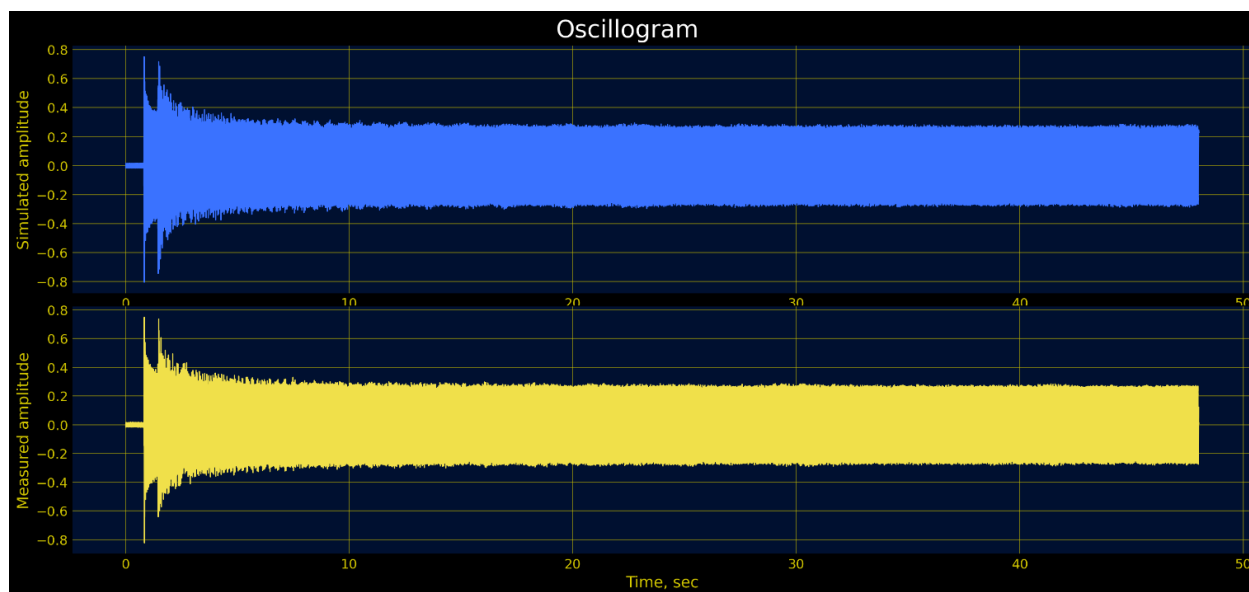


Рисунок 4.24 – Осцилограми змодельованих і натурних даних для експерименту 4

Спектральний аналіз (рисунок 4.25) показує, що, як і в попередніх трьох експериментах цієї групи, домінантний максимум спектра і для моделі, і для натурних даних спостерігається на частоті 21,00 Гц. Це дозволяє стверджувати, що при даному варіанті просторової дискретизації модель загалом стабільно відтворює цільову частотну складову.

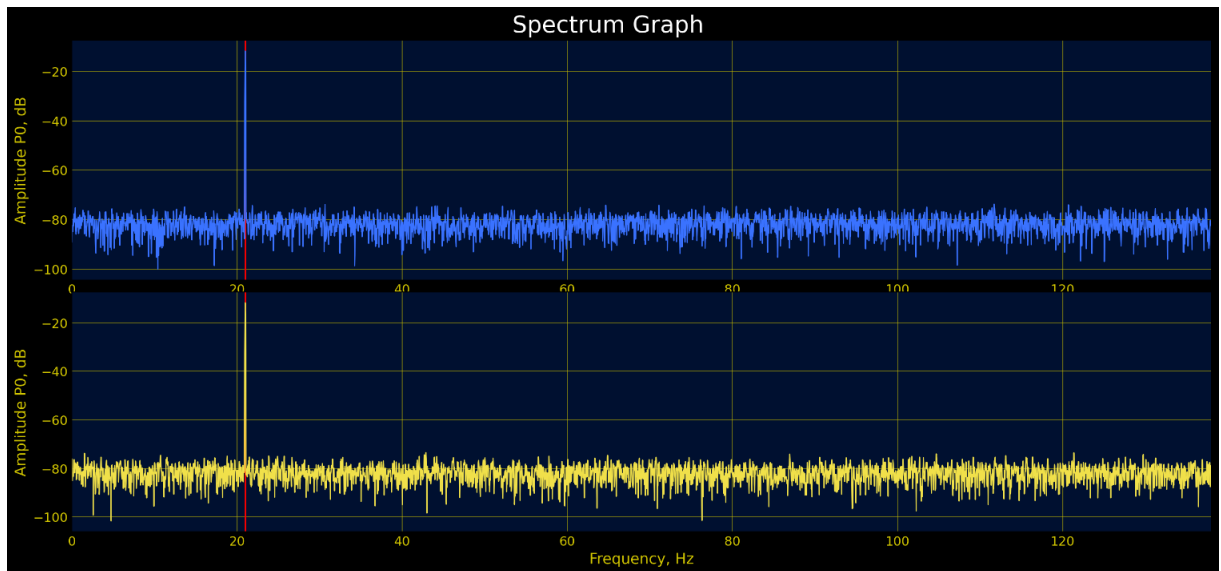


Рисунок 4.25 – Усереднені спектри змодельованих і натурних даних для експерименту 4

Графік амплітуди на вибраній частоті (рисунок 4.26) також демонструє доволі високу узгодженість кривих у часі. Хоча між ними є певні локальні відмінності, вони не є критичними і не змінюють загального висновку про добру збіжність сигналів.

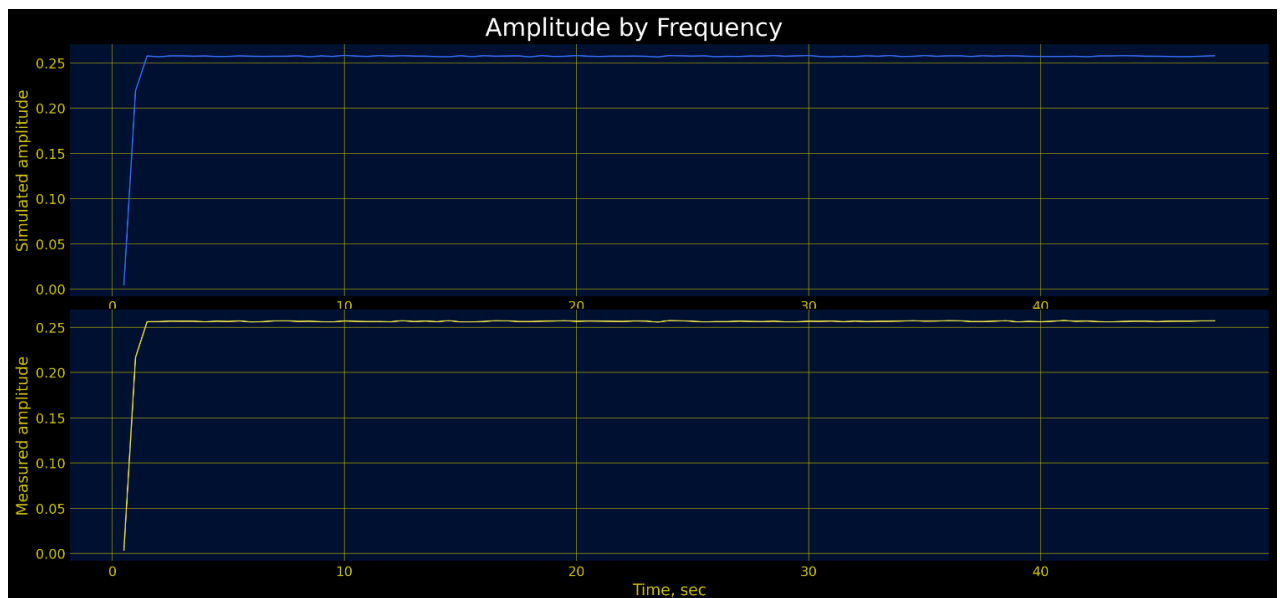


Рисунок 4.26 – Зміна амплітуди на виділеній частоті 21 Гц для експерименту 4

Для цього експерименту одержано такі числові результати (рисунок 4.27) :
 $RMSE = 0,003637$, середня нормована похибка = 0,36 %, $MAE = 0,003108$,
 коефіцієнт кореляції = 0,999795, максимальна абсолютна похибка = 0,009767.
 Положення піка дорівнює 21,00 Гц, а різниця енергії становить 0,601 %.

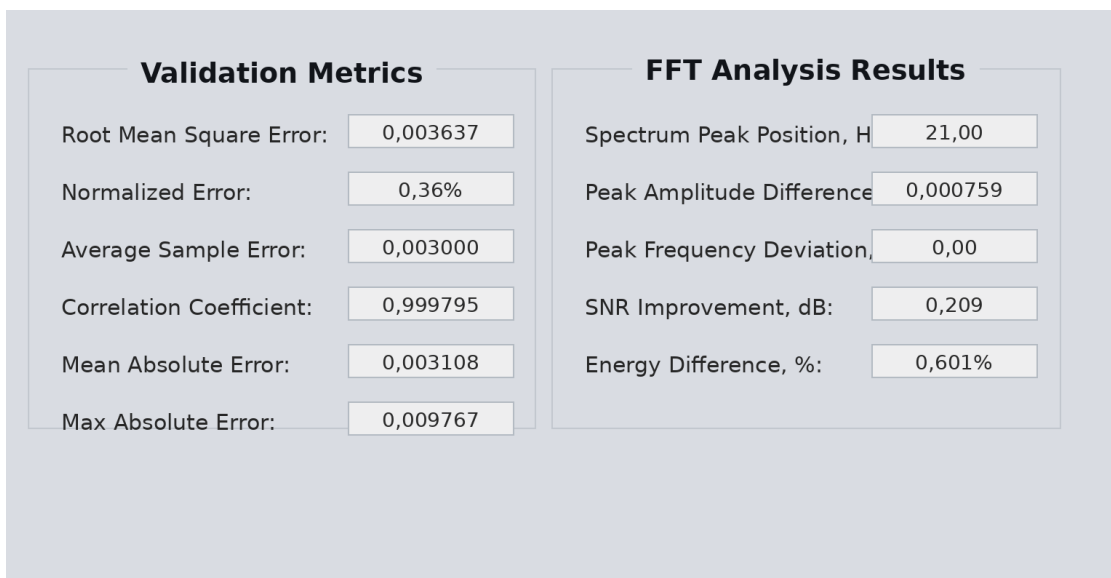


Рисунок 4.27 – Результати кількісного оцінювання відповідності змодельованих і натурних даних для експерименту 4

У цілому четвертий експеримент підтверджує, що для кроку сітки 2 у більшості випадків досягається висока точність узгодження між модельними і натурними даними.

П'ятий експеримент відкриває другу групу дослідів, у якій розрахунки виконувалися вже з кроком сітки 4. На осцилограмах (рисунок 4.28) зберігається загальна подібність між модельним та натурним сигналами. Часові графіки свідчать про те, що модель не втрачає здатності відтворювати основний характер процесу. Разом із тим у спектральній області з'являється важлива особливість, яка відрізняє цю групу від попередньої.

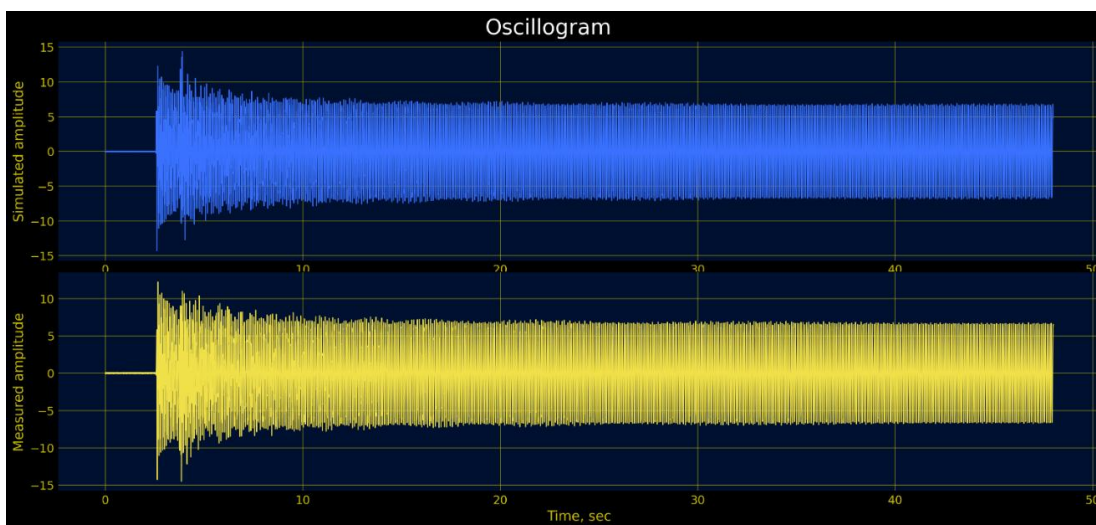


Рисунок 4.28 – Осцилограми змодельованих і натурних даних для експерименту 5

Усереднений спектр (рисунок 4.29) показує, що найбільший спектральний максимум у межах розглянутого діапазону вже спостерігається не на 21 Гц, а поблизу 10,50 Гц. При цьому графік амплітуди (рисунок 4.29) по частоті і надалі побудований саме для вибраної частоти 21 Гц, що дозволяє простежити поведінку саме цієї складової в часі навіть тоді, коли вона не є домінантною у повному спектрі. Такий результат є методично важливим, оскільки показує, що створений підхід дає змогу розділяти два аспекти аналізу: загальну спектральну домінанту та поведінку наперед заданої частотної компоненти.

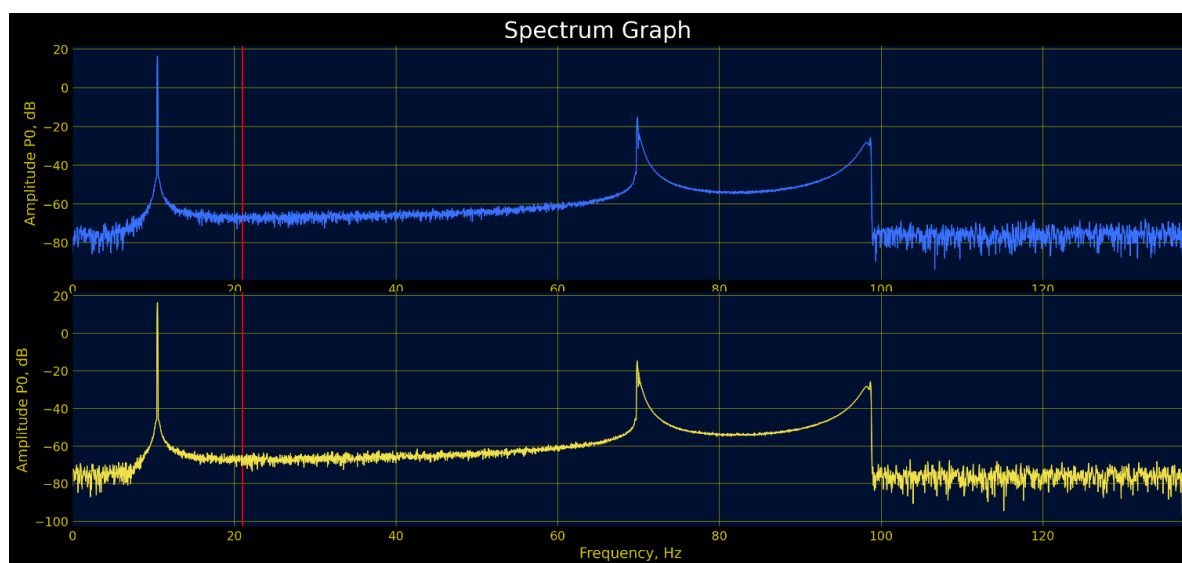


Рисунок 4.29 – Усереднені спектри змодельованих і натурних даних для експерименту 5

На графіку зміни амплітуди на виділеній частоті 21 Гц (рисунок 4.30) для п'ятого експерименту видно, що модель ще дозволяє простежити часову поведінку цієї складової, однак вона вже не є домінантною у повному спектрі. Оскільки найбільший максимум в усередненому спектрі зміщується до 10,50 Гц, цей рисунок слід інтерпретувати як відображення поведінки наперед заданої частотної компоненти, а не як підтвердження повної спектральної тотожності сигналів. Саме в цьому полягає методична цінність даного прикладу.

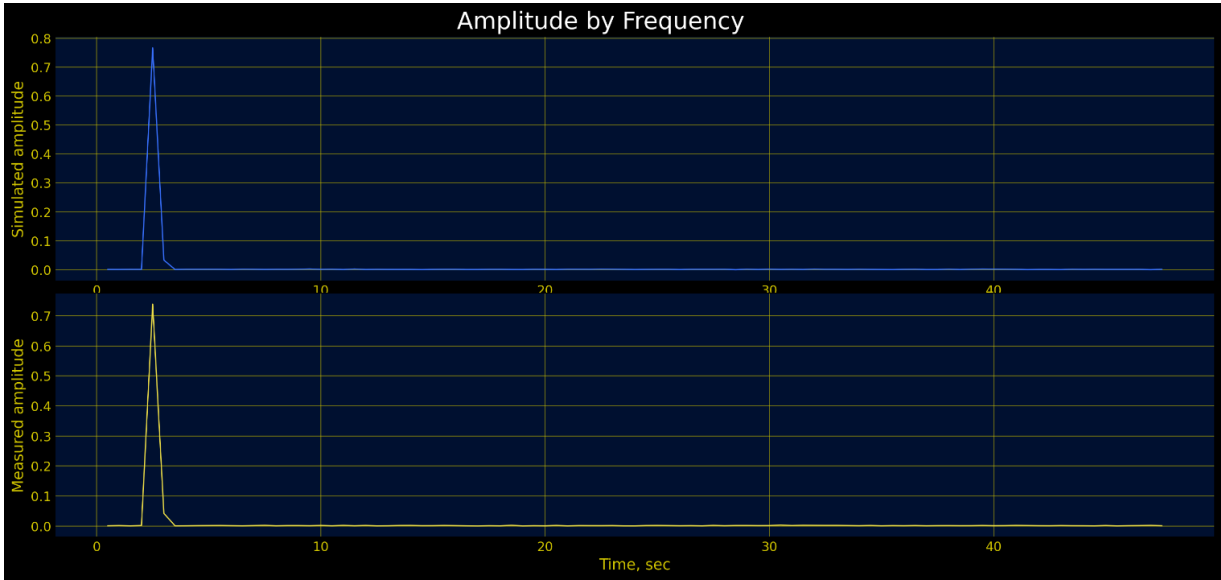


Рисунок 4.30 – Зміна амплітуди на виділеній частоті 21 Гц для експерименту 5

Для цього експерименту числові показники мають такі значення (рисунок 4.31): RMSE = 0,004125, середня нормована похибка = 0,41 %, MAE = 0,001368, коефіцієнт кореляції = 0,999858, максимальна абсолютна похибка = 0,037014. Положення спектрального піка становить 10,50 Гц, а різниця енергії зростає до 7,398 %.

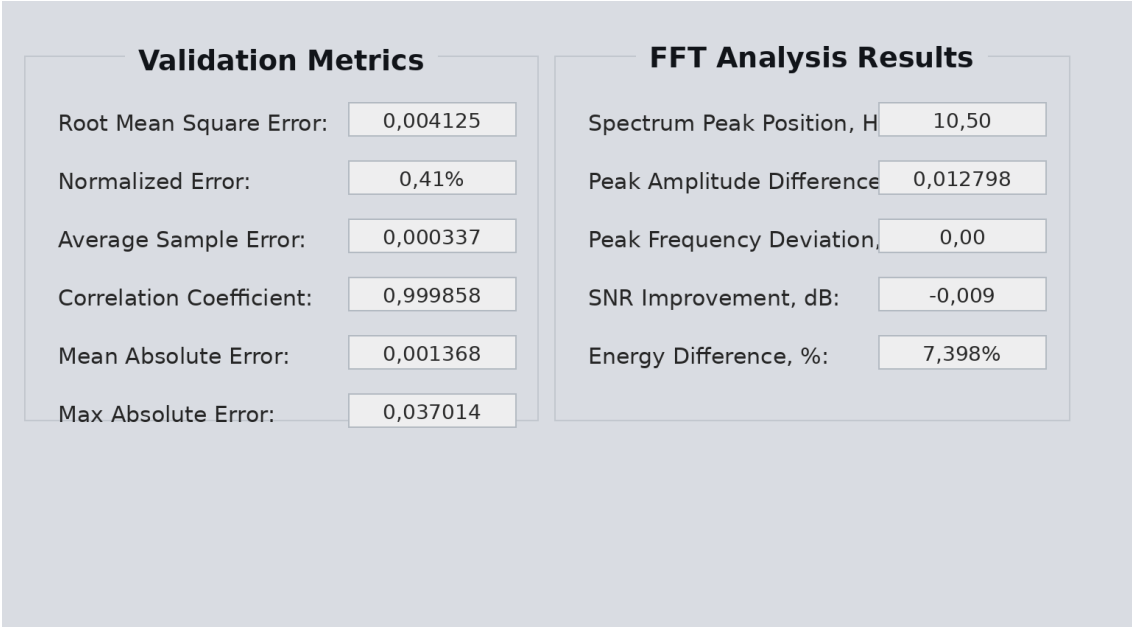


Рисунок 4.31 – Результати кількісного оцінювання відповідності змодельованих і натурних даних для експерименту 5

Отже, цей експеримент показує, що висока схожість часових реалізацій ще не гарантує повної тотожності спектральної структури, і саме тому поєднання кількох типів оцінювання є необхідним.

Шостий експеримент демонструє один із найкращих прикладів часової узгодженості в усій серії досліджень. Осцилограми (рисунок 4.32) майже повністю збігаються, а на графіку амплітуди на вибраній частоті 21 Гц криві модельного та натурального сигналів проходять практично разом. Це вказує на дуже високу відповідність між сигналами з точки зору їхньої часової поведінки.

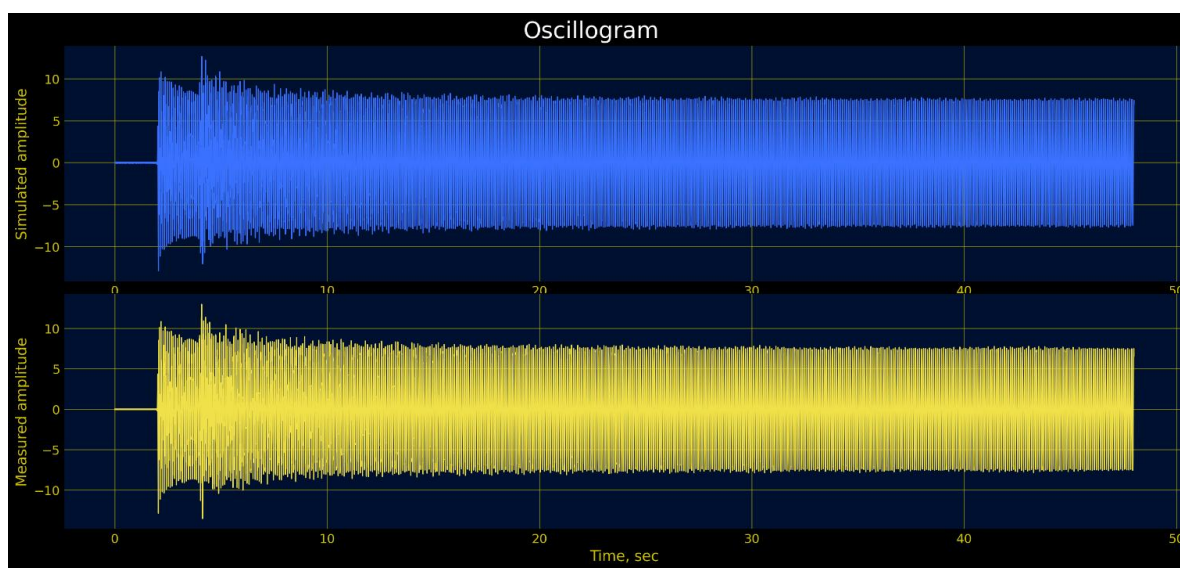


Рисунок 4.32 – Осцилограми змодельованих і натурних даних для експерименту 6

Разом із тим, як і в попередньому експерименті цієї групи, в усередненому спектрі (рисунок 4.33) домінантний максимум спостерігається не на 21 Гц, а на 10,50 Гц. Це означає, що при кроці сітки 4 модель у ряді випадків зберігає дуже високу часову кореляцію з натурними даними, але спектральна домінанта зміщується порівняно з тією ситуацією, яка спостерігалась для першої групи дослідів. Це свідчить про те, що збереження подібності сигналів у часовій області ще не гарантує правильного відтворення їхньої основної частотної структури. Отже, для таких конфігурацій валідація має обов'язково враховувати не лише часові метрики, а й спектральні ознаки, оскільки саме вони дозволяють виявити приховані відхилення у відтворенні фізично значущої компоненти сигналу.

Додатково це вказує на наявність систематичного відхилення у відтворенні цільової частоти, яке не є очевидним лише з аналізу часових реалізацій. Фактично

модель у цьому випадку коректно передає загальний характер процесу, проте не забезпечує належної точності у відтворенні частотної локалізації основної енергетичної складової.

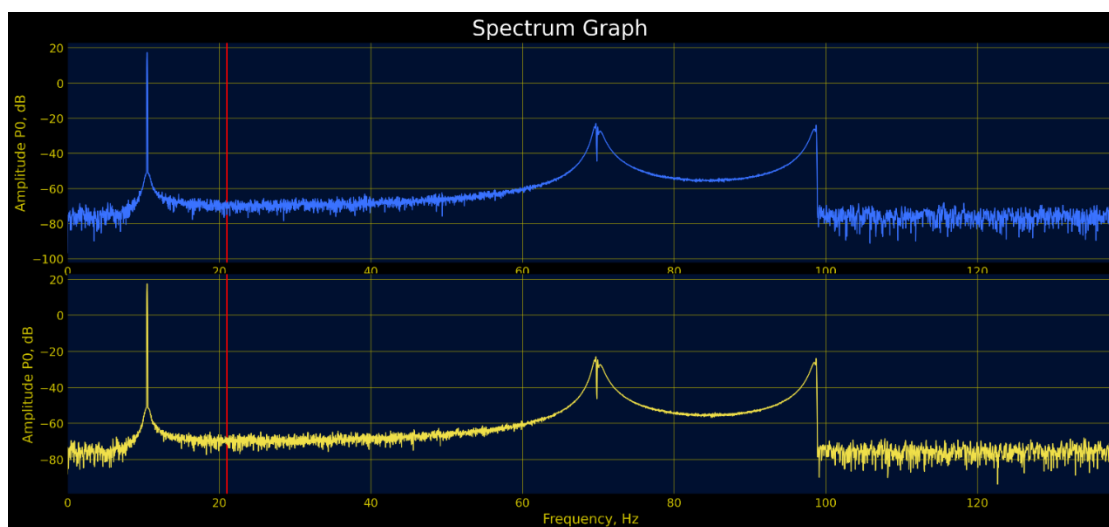


Рисунок 4.33 – Усереднені спектри змодельованих і натурних даних для експерименту 6

На графіку зміни амплітуди на виділеній частоті 21 Гц (рисунок 4.34) видно майже повний збіг кривих змодельованого та натурального сигналів у часі. Це свідчить про дуже високу узгодженість для вибраної частотної компоненти і робить шостий експеримент одним із найкращих за часовими показниками. Водночас цей результат слід розглядати разом зі спектральним графіком, де домінантний максимум зміщується до 10,50 Гц, тобто добра узгодженість на вибраній частоті ще не означає повного відтворення спектральної домінанти сигналу.

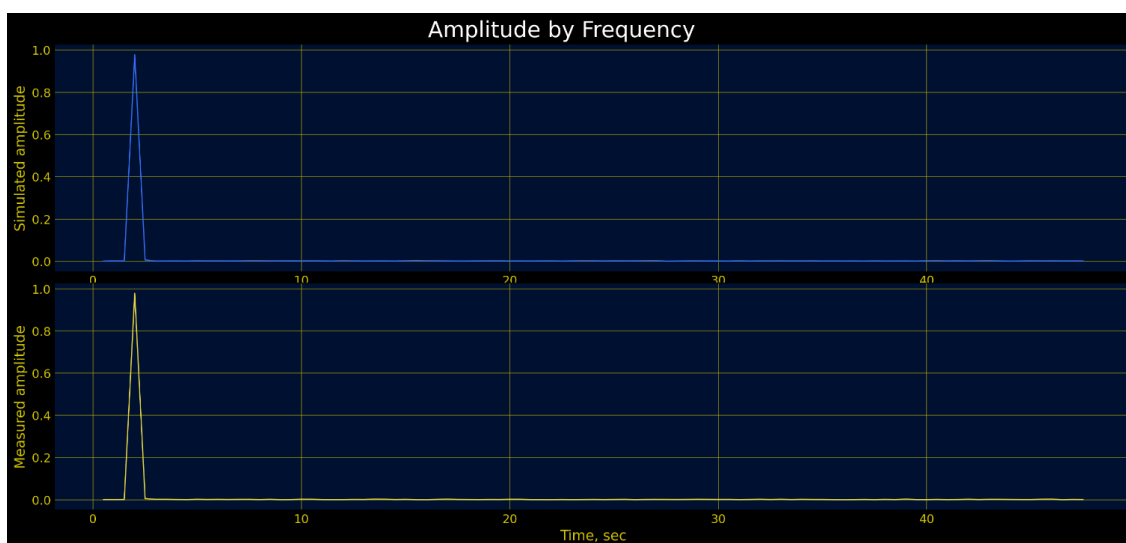


Рисунок 4.34 – Зміна амплітуди на виділеній частоті 21 Гц для експерименту 6

Числові метрики для шостого експерименту (рисунок 4.35) мають такі значення: $RMSE = 0,000946$, середня нормована похибка = 0,09 %, $MAE = 0,000766$, коефіцієнт кореляції = 0,999959, максимальна абсолютна похибка = 0,003043. При цьому положення спектрального піка дорівнює 10,50 Гц, а різниця енергії становить 0,371 %.

Validation Metrics		FFT Analysis Results	
Root Mean Square Error:	0,000946	Spectrum Peak Position, H	10,50
Normalized Error:	0,09%	Peak Amplitude Difference	0,005096
Average Sample Error:	0,000018	Peak Frequency Deviation,	0,00
Correlation Coefficient:	0,999959	SNR Improvement, dB:	-0,067
Mean Absolute Error:	0,000766	Energy Difference, %:	0,371%
Max Absolute Error:	0,003043		

Рисунок 4.35 – Результати кількісного оцінювання відповідності змодельованих і натурних даних для експерименту 6

Таким чином, цей приклад демонструє, що дуже мала похибка часової форми може поєднуватися зі зміною домінантної спектральної складової, і саме це добре фіксується розробленим методом.

У цьому експерименті знову спостерігається висока кореляція між модельними та натурними даними, якщо оцінювати їх за часовою формою. Осцилограми (рисунок 4.36) мають близький вигляд, а графік амплітуди на вибраній частоті 21 Гц також не демонструє різкої втрати узгодженості. Це може створювати враження дуже доброго збігу, якщо орієнтуватися лише на візуальний аналіз часових залежностей. Разом із тим, така візуальна близькість не є достатньою підставою для остаточного висновку про коректність моделі. У подібних випадках необхідно додатково аналізувати спектральні характеристики та числові метрики, оскільки саме вони дозволяють виявити відхилення, що не є очевидними при простому зіставленні осцилограм. Тому сьомий експеримент є

показовим з точки зору необхідності комплексної валідації, яка поєднує часовий, спектральний і кількісний аналіз.

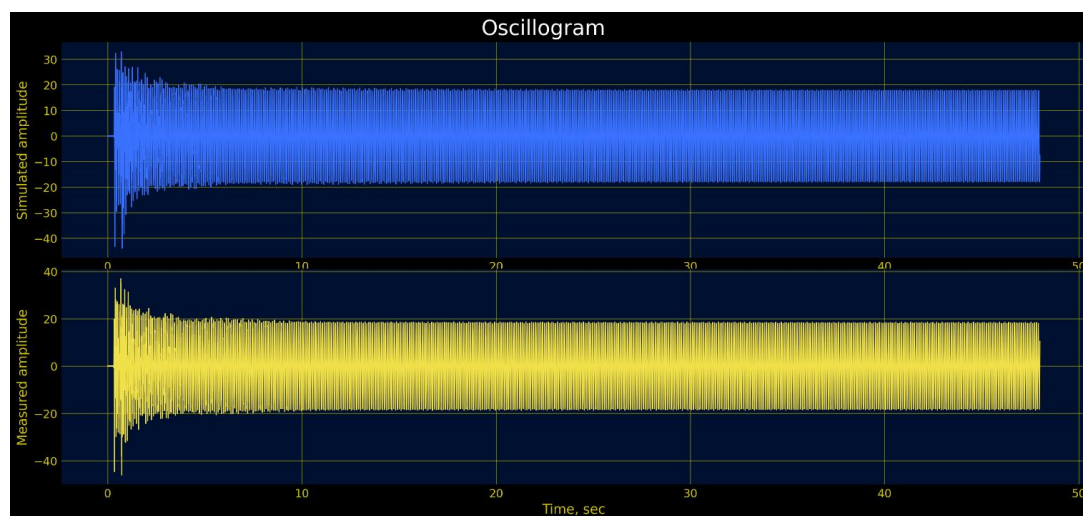


Рисунок 4.36 – Осцилограми змодельованих і натурних даних для експерименту 7

Однак спектральна картина в цьому випадку суттєво ускладнює інтерпретацію. Найбільший максимум в усередненому спектрі (рисунок 4.37) знову спостерігається на 10,50 Гц, а не на 21 Гц, причому різниця в амплітуді спектрального піка між змодельованим і натурним сигналами є значною. Це означає, що модель загалом правильно відтворює часовий перебіг сигналу, але помітно відрізняється за розподілом енергії в спектральній області.

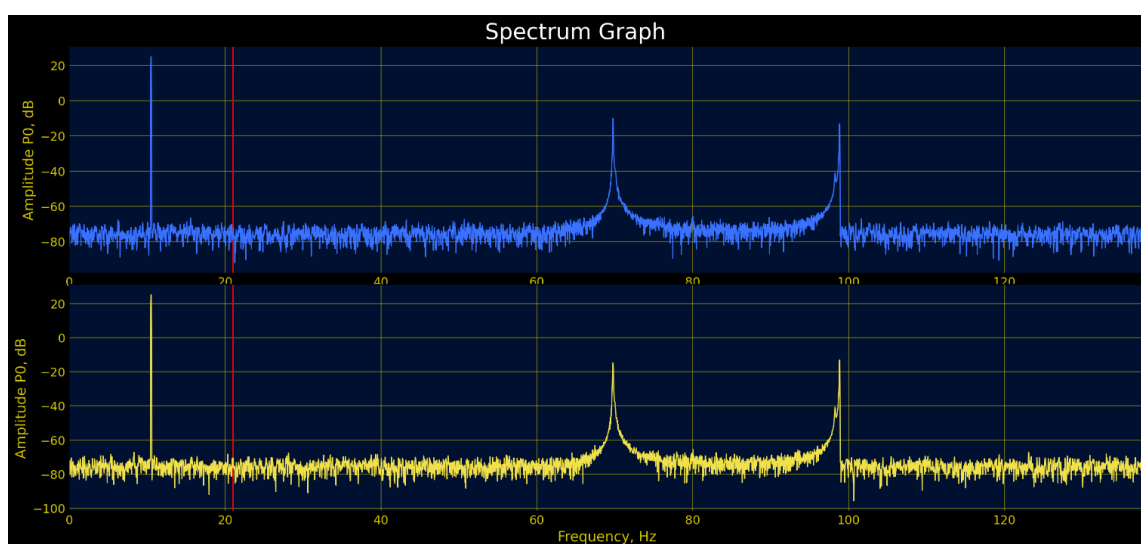


Рисунок 4.37 – Усереднені спектри змодельованих і натурних даних для експерименту 7

На графіку зміни амплітуди на виділеній частоті 21 Гц (рисунок 4.38) видно, що для сьомого експерименту загальна часова узгодженість між модельним і

натурним сигналами ще зберігається, однак вона вже не супроводжується такою самою спектральною відповідністю. Оскільки домінантний максимум в усередненому спектрі зміщується до 10,50 Гц, графік амплітуди на 21 Гц слід інтерпретувати як підтвердження лише часткової збіжності, а не повної тотожності сигналів.

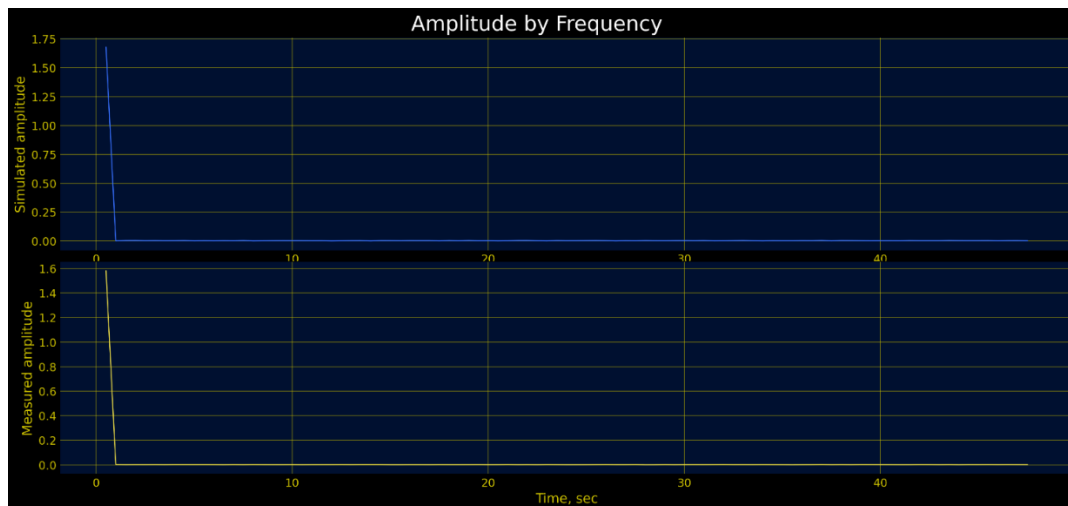


Рисунок 4.38 – Зміна амплітуди на виділеній частоті 21 Гц для експерименту 7

Формалізовані метрики підтверджують цей висновок (рисунок 4.39). Для сьомого експерименту отримано: $RMSE = 0,006523$, середня нормована похибка = 0,65 %, $MAE = 0,001282$, коефіцієнт кореляції = 0,999975, максимальна абсолютна похибка = 0,063160. Положення піка становить 10,50 Гц, а різниця енергії досягає 13,031 %.

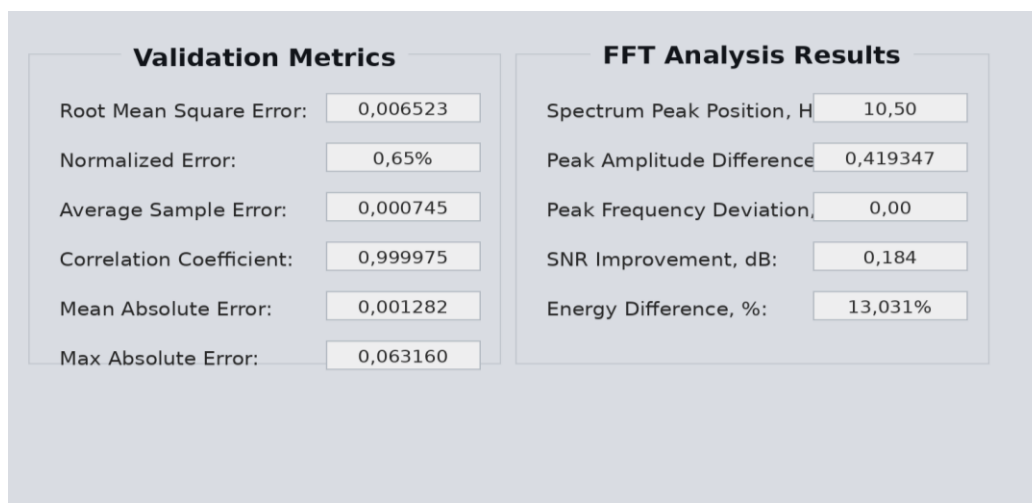


Рисунок 4.39 – Результати кількісного оцінювання відповідності змодельованих і натурних даних для експерименту 7

Таким чином, сьомий експеримент дуже добре демонструє практичну цінність розробленого методу: лише комплексне врахування часових, спектральних і числових показників дозволяє зробити коректний висновок щодо якості моделі.

Восьмий експеримент завершує серію досліджень і є одним із найбільш показових з точки зору накопичення розходжень між моделлю та натурними даними. На часових графіках (рисунок 4.40) сигнали все ще залишаються загалом подібними, однак ступінь цієї подібності вже менший, ніж у попередніх експериментах. Це помітно і на графіку амплітуди на вибраній частоті 21 Гц (рисунок 4.41), де відмінності в часовій поведінці стають виразнішими.

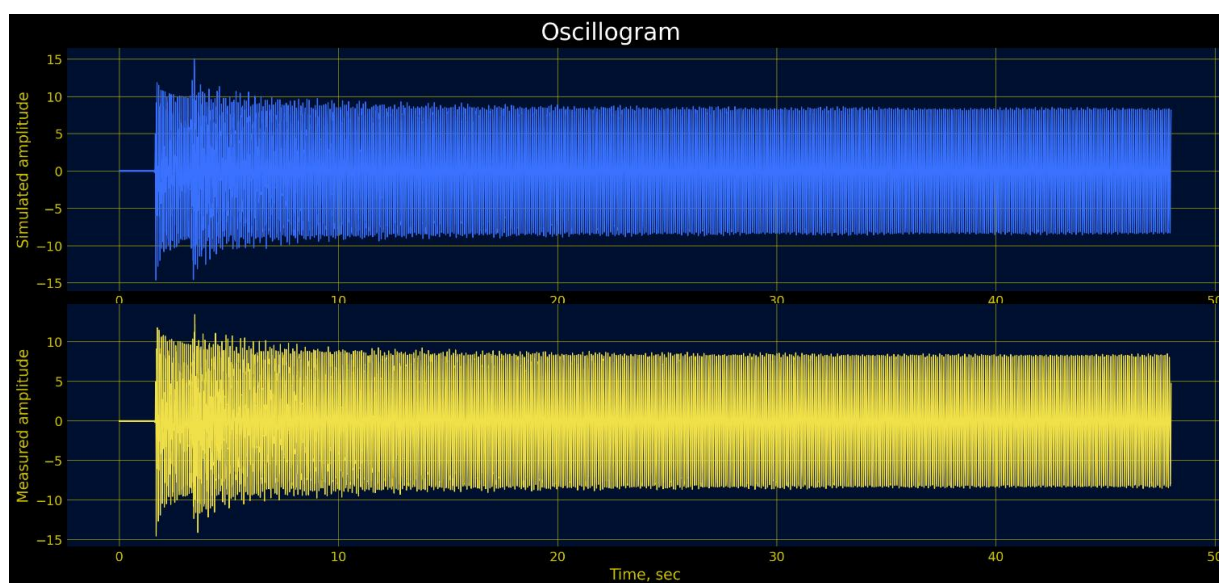


Рисунок 4.40 – Осцилограми змодельованих і натурних даних для експерименту 8

Усереднений спектр (рисунок 4.41) при цьому зберігає характерну для другої групи особливість: домінантний максимум розташовується поблизу 10,50 Гц. Отже, спектральна структура сигналу в цьому випадку також відрізняється від тієї, що спостерігалася в експериментах із кроком сітки 2, де домінувала компонента 21 Гц. Це ще раз підтверджує, що збільшення кроку сітки може не порушувати загальної часової подібності сигналів, але водночас призводити до систематичної зміни домінантної частотної складової, що є суттєвим з погляду валідації моделі.

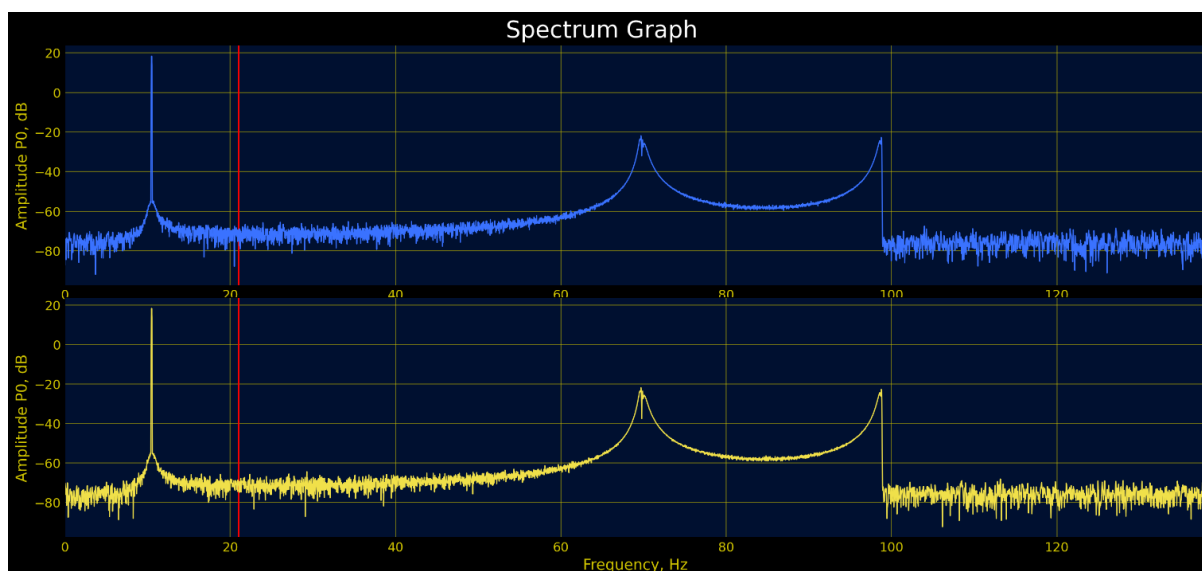


Рисунок 4.41 – Усереднені спектри змодельованих і натурних даних для експерименту 8

На графіку амплітуди на виділеній частоті 21 Гц (рисунок 4.42) вже чітко спостерігається погіршення узгодженості між модельним і натурним сигналами. Порівняно з попередніми експериментами криві мають помітніші локальні відхилення та не відтворюють одна одну з тією самою точністю, що свідчить про накопичення розбіжностей у часовій поведінці вибраної частотної складової. Це підтверджує, що за збільшеного кроку сітки модель може зберігати лише загальну подібність сигналу, але гірше відтворювати його амплітудну структуру наперед заданій частоті.

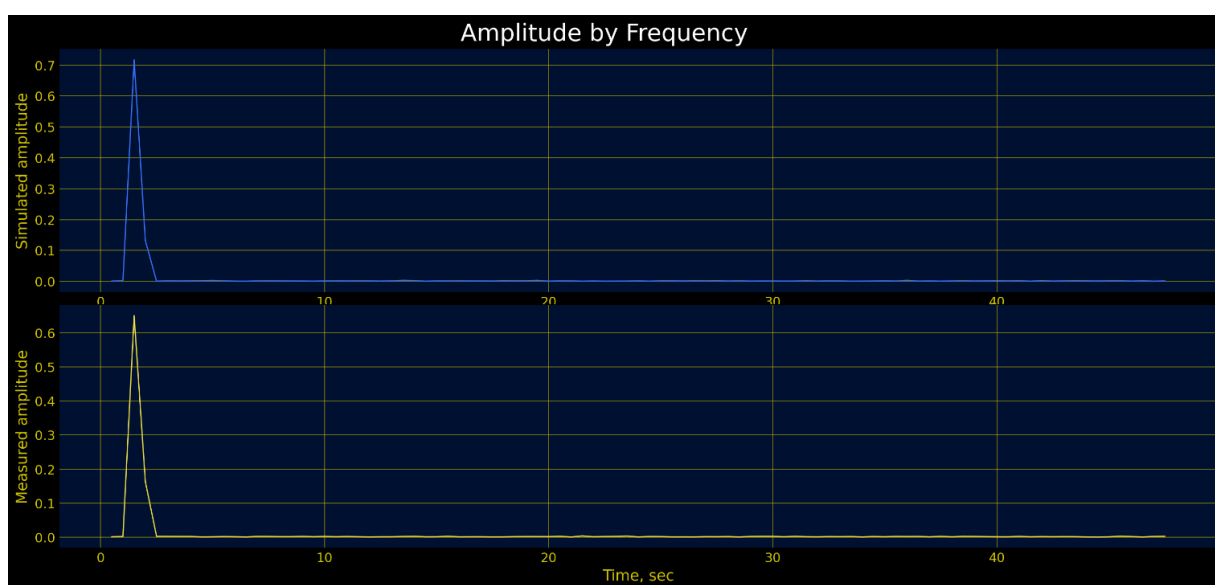


Рисунок 4.42 – Зміна амплітуди на виділеній частоті 21 Гц для експеримент 8

Числові результати (рисунок 4.43) є такими: $RMSE = 0,011613$, середня нормована похибка = 1,16 %, $MAE = 0,002828$, коефіцієнт кореляції = 0,997878, максимальна абсолютна похибка = 0,101570. Положення спектрального піка дорівнює 10,50 Гц, а різниця енергії зростає до 18,052 %, що є найбільшим значенням серед усіх восьми експериментів.

Validation Metrics		FFT Analysis Results	
Root Mean Square Error:	0,011613	Spectrum Peak Position, Hz	10,50
Normalized Error:	1,16%	Peak Amplitude Difference	0,039376
Average Sample Error:	0,000567	Peak Frequency Deviation	0,00
Correlation Coefficient:	0,997878	SNR Improvement, dB:	0,042
Mean Absolute Error:	0,002828	Energy Difference, %:	18,052%
Max Absolute Error:	0,101570		

Рисунок 4.43 – Результати кількісного оцінювання відповідності змодельованих і натурних даних для експерименту 8

Цей результат вказує на те, що при збільшеному кроці сітки модель може зберігати загальну подібність сигналу, але водночас накопичувати більш суттєві відмінності за амплітудними та енергетичними характеристиками.

Проведена серія з восьми експериментів дозволяє зробити кілька важливих висновків щодо ефективності створеного методу. По-перше, метод виявився придатним для комплексного зіставлення змодельованих і натурних даних, оскільки забезпечує можливість одночасного аналізу часової форми сигналів, їхньої спектральної структури, поведінки на вибраній частоті та формалізованих числових показників точності. По-друге, результати показали, що просте візуальне порівняння осцилограм або навіть високе значення коефіцієнта кореляції не завжди є достатніми для повної оцінки якості моделі. У ряді експериментів сигнали залишалися дуже близькими за часовою формою, але демонстрували помітні відмінності у спектральному розподілі енергії.

Для перших чотирьох експериментів, виконаних із кроком сітки 2, характерною є стабільна локалізація домінантного спектрального максимуму на частоті 21,00 Гц, що добре узгоджується з постановкою задачі. У більшості цих дослідів спостерігаються дуже малі значення похибок і високі коефіцієнти кореляції, хоча окремі випадки, зокрема третій експеримент, демонструють можливість погіршення часової узгодженості навіть за правильного відтворення основної частоти.

Для наступних чотирьох експериментів, виконаних із кроком сітки 4, ситуація є більш складною. Хоча часові графіки в багатьох випадках також свідчать про високий ступінь подібності, усереднений спектральний аналіз показує зміщення домінантного максимуму до області 10,50 Гц. Водночас зростання різниці енергії та збільшення окремих похибок у цій групі свідчать про те, що збільшення кроку сітки може впливати на точність спектрального відтворення натурального процесу.

Дані, наведені в табл. 4.1, підтверджують, що створений метод дозволяє кількісно оцінювати ступінь відповідності між змодельованими та натурними даними за сукупністю похибкових показників. Для експериментів із кроком сітки 2 в більшості випадків спостерігаються малі значення RMSE, MAE та нормованої похибки, що свідчить про достатньо високу точність відтворення натурального сигналу. Водночас третій експеримент демонструє помітне зростання похибок, що вказує на зниження якості узгодження навіть у межах цієї групи.

Для експериментів із кроком сітки 4 результати є менш однорідними. З одного боку, окремі досліді, зокрема експеримент 6, характеризуються дуже малими значеннями похибок. З іншого боку, для експериментів 7 і 8 спостерігається істотне зростання максимальної абсолютної похибки та різниці енергії, що свідчить про накопичення відмінностей між змодельованими та натурними даними. Таким чином, узагальнені результати показують, що запропонований метод дає змогу не лише виявляти випадки високої відповідності, а й надійно фіксувати ситуації, у яких точність моделі погіршується внаслідок зміни параметрів чисельного розрахунку.

Таблиця 4.1 – Узагальнені результати оцінювання похибок при порівнянні змодельованих та натурних даних

Експеримент	Крок сітки	RMSE	Нормована похибка, %	MAE	Максимальна абсолютна похибка	Різниця енергії, %
1	2	0,002538	0,261	0,002049	0,006278	0,125
2	2	0,002474	0,247	0,001882	0,008149	0,205
3	2	0,020015	2,002	0,019995	0,022483	3,968
4	2	0,003637	0,364	0,003108	0,009767	0,601
5	4	0,004125	0,412	0,001368	0,037014	7,398
6	4	0,000946	0,095	0,000766	0,003043	0,371
7	4	0,006523	0,652	0,001282	0,063160	13,031
8	4	0,011613	1,161	0,002828	0,101570	18,052

На рисунку 4.44 наведено результат роботи модуля відбору конфігурацій, який реалізує підхід до визначення допустимих та оптимальних параметрів моделі за критеріями точності і ресурсної здійсненності. У цьому прикладі як ресурсний критерій обрано час виконання, а як параметр, що варіюється, використано крок сітки. Аналіз проводився на основі восьми експериментів, для яких порівнювалися змодельовані та натурні дані. При цьому натурні дані бралися як еталон для серії експериментів із кроком сітки 2, а змодельовані дані розглядалися для обох груп конфігурацій — з кроком сітки 2 та з кроком сітки 4. Така постановка дозволяє безпосередньо оцінити, як зміна кроку сітки впливає на компроміс між точністю моделі та тривалістю її обчислення.

Оцінювання точності виконувалося за метрикою NMAE, яка в межах запропонованого методу використовується як нормована узагальнена характеристика відмінності між змодельованим та натурним сигналами. Менші значення NMAE відповідають кращій узгодженості між результатами моделювання та експериментальними даними. Таким чином, для кожної конфігурації одночасно враховувалися два показники: час виконання розрахунку та значення NMAE. Це дає змогу перейти від простого порівняння окремих запусків до формального вибору

конфігурацій, що є або найбільш точними, або найвигіднішими з погляду співвідношення точності та витрат ресурсу.

Amplitude by Frequency	Spectrum Graph	Oscillogram	Main Results (Metrics)	Config Selection
Resources Select resource: ☒ Time ☐ RAM Optimize				
Candidate Configurations				
Mode		GridStep	Time, s	NMAE
Maximum parameters		2	383.00	0.0166
Optimal parameters		2	363.00	0.0177
Experiment 1		2	383.00	0.0166
Experiment 2		2	363.00	0.0177
Experiment 3		2	381.00	0.0239
Experiment 4		2	369.00	0.0183
Experiment 5		4	140.00	1.0093
Experiment 6		4	133.00	1.0144
Experiment 7		4	139.00	1.0162
Experiment 8		4	153.00	1.0186

Рисунок 4.44 – Результати відбору конфігурацій моделі за критеріями точності та часу виконання

У таблиці, поданій на рисунку, результати впорядковані у формі множини кандидатних конфігурацій. Для кожного експерименту наведено значення кроку сітки, часу виконання та відповідної похибки NMAE. Додатково у верхній частині таблиці виділено два підсумкові рядки: Maximum parameters і Optimal parameters. Перший рядок відповідає конфігурації, яка забезпечує мінімальне значення NMAE, тобто найкращу точність серед усіх перевірених варіантів. Другий рядок відповідає конфігурації, яка має мінімальний час виконання серед тих, що задовольняють обмеження на допустиму похибку. У наведеному прикладі як межу допустимості використано умову $NMAE \leq 0,2$, що дозволяє сформулювати область прийнятних конфігурацій і вже в її межах вибрати найменш ресурсоємний варіант.

Отримані результати показують, що конфігурація з кроком сітки 2 метри забезпечує найменше значення похибки: $NMAE = 0,0166$ при часі виконання 383 с. Саме вона була віднесена до категорії Maximum parameters, тобто до варіанта з максимально досяжною точністю в розглянутій множині конфігурацій. Водночас конфігурація, визначена як Optimal parameters, також має крок сітки 2, але

характеризується меншим часом виконання — 363 с, при незначному збільшенні похибки до $NMAE = 0,0177$. Оскільки це значення також належить до області допустимих, така конфігурація є більш вигідною з практичного погляду, коли пріоритетом є зменшення обчислювальних витрат без істотної втрати точності.

Важливим результатом є те, що конфігурації з кроком сітки 4 не були обрані як оптимальні. Це пояснюється тим, що хоча вони мають значно менший час виконання, їхня точність за обраною метрикою виявилася гіршою. Отже, зменшення обчислювальних витрат у цьому випадку супроводжується відчутним погіршенням узгодженості між змодельованими та натурними даними. Саме така ситуація добре демонструє практичну цінність запропонованого методу: він дозволяє не інтуїтивно, а формально обґрунтувати, чому більш швидка конфігурація не завжди є прийнятною, якщо вона не забезпечує заданий рівень точності.

Наведений результат підтверджує працездатність створеного модуля відбору конфігурацій та ефективність запропонованого підходу до визначення параметрів моделі. Реалізований механізм дозволяє автоматизовано формувати множину кандидатних варіантів, оцінювати їх за метриками точності та ресурсу, а також виділяти як конфігурацію з найкращою точністю, так і конфігурацію, що є оптимальною з погляду співвідношення “точність — час виконання”. У контексті задачі валідації математичних моделей поширення акустичних хвиль це є важливим, оскільки дозволяє перейти від окремих експериментальних порівнянь до системного вибору параметрів чисельної моделі, придатних для практичного використання в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

Висновки до Розділу 4

У четвертому розділі виконано програмну реалізацію запропонованого методу валідації математичних моделей гідроакустичних полів у вигляді програмного комплексу, що забезпечує автоматизоване виконання основних етапів підготовки, узгодження, оцінювання та інтерпретації результатів валідації.

Показано, що структура програмного засобу відповідає загальній схемі методу, сформульованій у попередніх розділах, і охоплює завантаження даних, їх підготовку, запуск чисельного моделювання, спектрально-статистичну оцінку та формування області допустимих параметрів.

Розроблена архітектура програмної реалізації побудована як сукупність взаємодіючих функціональних підсистем: підсистеми обробки та підготовки даних сенсора, підсистеми підготовки постановки і керування чисельним моделюванням, окремого контуру валідації, модуля каскадного відбору конфігурацій, а також засобів представлення результатів і керування артефактами експерименту. Така організація забезпечує модульність, відтворюваність обчислень і можливість подальшого розвитку програмного засобу.

У межах реалізації процесів завантаження та підготовки даних забезпечено контроль формату вхідних файлів, багатокрокове відкриття даних, формування внутрішнього подання сигналів і фіксацію параметрів їх обробки. Реалізовано необхідні процедури калібрування, фільтрації, інтерполяції, децимації, перетворення Фур'є та витягу амплітудно-фазових характеристик, що створює практичну основу для коректного переходу від «сирих» даних до ознак, придатних для валідації.

Окремо реалізовано алгоритми спектральної та статистичної оцінки, які забезпечують кількісне визначення ступеня узгодженості модельних і натурних даних. Отримані метрики інтегровано в модуль відбору конфігурацій параметрів, де вони використовуються разом із перевітками чисельної коректності та ресурсної здійсненності для формування області допустимих рішень. Це дозволило перейти від ізольованого аналізу точності до автоматизованого вибору практично придатних конфігурацій чисельної моделі.

Показано, що програмна реалізація не лише відтворює теоретично запропонований метод, а й робить процедуру валідації інтерпретованою для користувача. Завдяки стандартизованому представленню параметрів, таблицям допустимих конфігурацій і явному вибору ресурсного критерію забезпечено

прозорість прийняття рішень, документування результатів і можливість безпосереднього порівняння серій експериментів між собою.

Отже, у розділі підтверджено, що розроблений програмний комплекс є придатним для практичної реалізації методу валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль і може використовуватися як інструмент відтворюваного аналізу узгодженості моделі з натурними вимірюваннями в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання розроблення та обґрунтування методів і програмних засобів валідації дискретних математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль на основі коректного узгодження сигналів чисельного моделювання і натурних вимірювань, а також методу визначення параметрів і області їх допустимих значень у параметричному просторі конфігурацій чисельної постановки за умов обмежених обчислювальних ресурсів.

У дисертаційному дослідженні отримано такі основні наукові результати:

1. Проведено аналіз сучасних методів валідації чисельних моделей гідроакустичних полів, методів цифрової обробки сигналів та способів оцінювання узгодженості результатів моделювання з натурними вимірюваннями. Показано, що в задачах розповсюдження акустичних хвиль проблема достовірності результатів не зводиться лише до вибору адекватної фізичної чи математичної моделі середовища. Не менш важливими є спосіб представлення сигналів, процедури їх попередньої обробки, вибір інформативних ознак та критерії кількісного порівняння. За результатами аналізу встановлено, що існуючі методи здебільшого орієнтовані або на вузькі прикладні постановки, або не забезпечують достатньої формалізації процедур зіставлення модельних і експериментальних даних в умовах шумів, часових зсувів, фазових розбіжностей та обмежених обчислювальних ресурсів. Це підтвердило актуальність розроблення спеціалізованих методів валідації саме для дискретних математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль.

2. Обґрунтовано обмеження існуючих методів прямого порівняння модельних і експериментальних часових рядів. Встановлено, що безпосереднє зіставлення «сирих» часових реалізацій не забезпечує об'єктивної оцінки якості моделі, оскільки розбіжності між сигналами можуть визначатися не тільки помилками чисельної постановки, а й різницею частот дискретизації, нерівномірністю часової прив'язки, наявністю багатокomпонентного шуму, фазовими зміщеннями та відмінностями у способах реєстрації й збереження даних.

Показано, що за таких умов навіть візуально схожі сигнали можуть мати суттєво відмінні числові оцінки, а візуально різні — відображати одну й ту саму фізичну подію. Таким чином доведено, що коректна валідація потребує не прямого порівняння початкових рядів, а попереднього методично обґрунтованого узгодження сигналів та переходу до більш стійких форм їх представлення.

3. Удосконалено метод підготовки й узгодження модельних і натурних сигналів, що включає вибір параметрів узгодження, ресемплінг часових рядів, антиаліасингову фільтрацію, нормування та формування зіставних вибірок. Запропонований метод забезпечує приведення модельного та експериментального сигналів до спільного формату аналізу, у якому усуваються або мінімізуються відмінності, не пов'язані безпосередньо з якістю математичної моделі. На відміну від спрощених схем попередньої обробки, удосконалений метод передбачає контроль коректності переходу між різними часовими сітками, збереження інформативної структури сигналу після зміни частоти дискретизації та зменшення впливу спотворень, пов'язаних з аліасингом. Практичне значення одержаного результату полягає в тому, що модельні та натурні дані можуть бути підготовлені до подальшого порівняння у відтворюваний і програмно автоматизований спосіб без необхідності ручного коригування на кожному окремому експерименті.

4. Удосконалено метод спектральної оцінки модельних і експериментальних сигналів із виділенням інформативної складової на частоті випромінювача та формуванням амплітудних характеристик, придатних для статистичного порівняння. Показано, що у багатотонових та зашумлених гідроакустичних сигналах саме виділення фізично значущої тональної компоненти дозволяє зосередити аналіз на тій частині сигналу, яка найбільш повно відображає адекватність чисельного відтворення процесу поширення хвиль. Удосконалений метод включає спектральний аналіз, вибір робочої частоти, вузькосмугову фільтрацію та формування амплітудного представлення, стійкішого до фазових зсувів і побічних широкосмугових завад. Завдяки цьому створено основу для переходу від порівняння повних часових осцилограм до аналізу інформативних

ознак, які краще відповідають фізичному змісту задачі валідації та забезпечують вищу стабільність кількісних оцінок.

5. Удосконалено та реалізовано метод статистичного оцінювання узгодженості результатів моделювання з експериментальними даними. Визначено, що для задачі автоматизованого вибору параметрів чисельної постановки доцільно використовувати нормовані метрики похибки, які дають однозначну скалярну оцінку для кожної конфігурації та є достатньо стійкими до залишкових фазових зсувів, масштабних відмінностей і шумових спотворень. У роботі використано порогове значення нормалізованої середньої абсолютної похибки $NMAE \leq 0,2$ як критерій прийнятної точності конфігурації моделі. Практична цінність цього результату полягає у створенні формальної основи для переходу від якісної, візуальної оцінки схожості сигналів до об'єктивної числової процедури валідації.

6. Вперше розроблено метод визначення параметрів і області їх допустимих значень для дискретної математичної моделі на основі послідовного відбору конфігурацій за критеріями чисельної коректності, ресурсної здійсненності та порогової точності. На відміну від ручного або евристичного підбору параметрів, запропонований метод формалізує процедуру вибору конфігурацій у параметричному просторі чисельної постановки та дозволяє розглядати точність і обчислювальні витрати як взаємопов'язані критерії. Метод передбачає двоетапну схему відбору: спочатку визначається конфігурація з максимальною точністю, а далі серед конфігурацій, які задовольняють поріг прийнятності $NMAE \leq 0,2$, обирається ресурсно-ефективна конфігурація з меншим часом виконання. Це дає можливість визначати не лише окремий «кращий» набір параметрів, а й область допустимих конфігурацій, придатних для практичного використання за умов обмежених обчислювальних ресурсів.

7. Проведено експериментальну перевірку запропонованих методів на натурних гідроакустичних даних SWellEx-96 і оцінено досягнутий компроміс між точністю та обчислювальними витратами. Експериментальна апробація виконана на реальних даних, що містять характерні для природних умов шумові компоненти, багатопроменеві ефекти та інші фактори, які ускладнюють пряме порівняння з

результатами чисельного моделювання. Для розглянутого експериментального фрагмента автоматизований вибір ресурсно-ефективної конфігурації дозволив скоротити час чисельного моделювання приблизно у 2,96 раза без перевищення встановленого порогу похибки $NMAE \leq 0,2$. У відносному вираженні це відповідає зменшенню часу виконання приблизно на 66,2 % порівняно з базовою конфігурацією. Отримані результати підтверджують, що найточніші конфігурації не завжди є найдоцільнішими з практичної точки зору через підвищені витрати обчислювального часу, а тому вибір параметрів має виконуватися з урахуванням компромісу між якістю відтворення сигналу та ресурсною ефективністю.

8. Вперше реалізовано програмні засоби, що забезпечують автоматизацію етапів підготовки даних, спектрально-статистичної оцінки та формування області допустимих параметрів чисельної моделі. У межах роботи створено програмну реалізацію, яка інтегрує процедури завантаження та попередньої перевірки даних, калібрування, ресемплінгу, фільтрації, спектрального аналізу, обчислення метрик узгодженості, запуску серійних прогонів і відбору прийнятних конфігурацій. Розроблений програмний засіб забезпечує відтворюваність обчислювальних експериментів, зменшує залежність результатів від ручних дій користувача та створює практичну основу для використання запропонованих методів у спеціалізованих програмно-апаратних комплексах. Експериментально підтверджено, що програмна реалізація забезпечує автоматизований вибір ресурсно-ефективної конфігурації з досягненням порогової точності $NMAE \leq 0,2$ та скороченням часу моделювання приблизно на 66,2 % для розглянутого натурного фрагмента.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гейко О. О. Забезпечення правильності комп'ютерних моделей через верифікацію та валідацію. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. 2023. Том 34(73). № 4. С. 30–37. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/06>.
2. Гейко О. О., Варава І. А. Еталонна архітектура для програмної платформи верифікації математичних моделей. Наукові праці Міжрегіональної академії управління персоналом. Інформаційні технології та суспільство. 2024. Вип. 2(13). С. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.2.3>.
3. Гейко О. О., Варава І. А. Особливості програмних рішень в області верифікації і валідації чисельних моделей. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2025. DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2025.27.3.354592>.
4. Гейко О. О., Варава І. А., Пуха Г. С., Дембіцький В. В., Вдовина А. В. Метод валідації чисельних моделей поширення гідроакустичних хвиль з узгодженням частот дискретизації та спектральної оцінки. Системні технології. 2026. Вип. 2(163). С. 23–34. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-163-2026-03>.
5. Гейко О. О. Методи валідації математичних моделей. Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики : матеріали XX Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів, 25–28 квітня 2023 р. Київ, 2023. URL: https://iate.kpi.ua/uploads/p_21_72711255.pdf.
6. Гейко О. О., Варава І. А. Валідація математичних моделей статистичним методом. Збірник матеріалів III Міжнародної науково-технічної конференції «Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку». Київ, 30 листопада 2023 року. Київ: Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, 2023. С. 110–111.
7. Гейко О. О., Варава І. А. Проблематика валідації математичних моделей. Збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої

125-й річниці КПІ ім. Ігоря Сікорського «Сучасні аспекти інженерії програмного забезпечення».

8. Гейко О. О., Варава І. А. Інструменти представлення математичних формул в програмному забезпеченні. Збірник матеріалів 2-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні аспекти інженерії програмного забезпечення».

9. Ванін В., Залевська О., Сидоренко Ю., Войтович А. Аналіз методів моделювання розповсюдження звуку у хвилеводі. Сучасні проблеми моделювання. 2021. № 21. С. 47–53. DOI: <https://doi.org/10.33842/22195203/2021/21/47/53>.

10. Shankland R. S. Principles and Applications of Underwater Sound. Physics Today. 1970. Vol. 23, No. 3. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3022035>. URL: <https://physicstoday.aip.org/reviews/principles-and-applications-of-underwater-sound> (дата звернення: 18.02.2026).

11. Rossing T. D. (ed.). Springer Handbook of Acoustics. 2nd ed. New York : Springer, 2014.

12. Clay C. S., Medwin H. Acoustical Oceanography: Principles and Applications. New York : John Wiley & Sons, 1977. XVIII, 544 p. ISBN 978-0-471-16041-0.

13. Beyer R. T. Sounds of Our Times: Two Hundred Years of Acoustics. New York : AIP Press, 1999. XVI, 444 p. ISBN 978-0-387-98435-3. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=kebDOljfX7oC&oi=fnd&pg=PR7&dq=history+of+acoustics&ots=JZevIhvSkc&sig=0P8tthSH_CNplafXNydytKHvL7U&redir_esc=y#v=onepage&q=history%20of%20acoustics&f=false (дата звернення: 18.02.2026).

14. Odom, R. (2011). An Introduction to Underwater Acoustics—Principles and Applications, (Second Edition). Noise Control Engineering Journal. DOI: <https://doi.org/10.3397/1.3525563> (дата звернення: 18.02.2026).

15. Jensen F. B., Kuperman W. A., Porter M. B., Schmidt H. Computational Ocean Acoustics. 2nd ed. New York : Springer, 2011.

16. Clay C. S., Medwin H. Acoustical Oceanography: Principles and Applications. New York : Wiley, 1977.

17. Medwin H., Clay C. S. Fundamentals of Acoustical Oceanography. San Diego : Academic Press, 1998.
18. Urick R. J. Principles of Underwater Sound. 3rd ed. New York : McGraw-Hill, 1983. 423 p.
19. Ainslie M. A. Principles of Sonar Performance Modeling. Berlin ; Heidelberg : Springer, 2010.
20. Etter P. C. Underwater Acoustic Modeling and Simulation. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2013.
21. Jensen F. B., Kuperman W. A., Porter M. B., Schmidt H. Computational Ocean Acoustics. 2nd ed. New York : Springer, 2011.
22. Collins M. D. A split-step Padé solution for the parabolic equation method. The Journal of the Acoustical Society of America. 1993. Vol. 93, No. 4. P. 1736–1742. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.406739>.
23. Waite A. D. Sonar for Practising Engineers. 3rd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2002. 324 p.
24. Mackenzie K. V. Nine-term equation for sound speed in the oceans. The Journal of the Acoustical Society of America. 1981. Vol. 70, No. 3. P. 807–812. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.386920>
25. Buckingham M. J. Ocean-acoustic propagation models. Journal d'Acoustique. 1992. Vol. 5, No. 3. P. 223–287.
26. Tappert F. D. The parabolic approximation method. Wave Propagation and Underwater Acoustics / ed. by J. B. Keller, J. S. Papadakis. Berlin ; Heidelberg : Springer, 1977. P. 224–287.
27. Burdic W. S. Underwater Acoustic System Analysis. 2nd ed. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1991.
28. Yuan G., Jiang W., Hua H. Hydroacoustic analysis of open cavity subsonic flow based on multiple parameter numerical models. Journal of Hydrodynamics. 2015. Vol. 27. P. 668–678. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(15\)60529-7](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(15)60529-7).
29. Свинчук О. В., Євтушенко А. М., Пуха Г. С., Пироговська Т. В. Комп'ютерне моделювання розповсюдження гідроакустичного сигналу

променевим методом. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2022. Т. 24, № 1. DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2022.24.1.262745>.

30. Courbet B., Benoit C., Couaillier V., Haider F., Le Pape M. C. et al. Space Discretization Methods. Aerospace Lab. 2011. No. 2. P. 1–14. HAL: hal-01181265. URL: <https://hal.science/hal-01181265v1>.

31. Kwaśniewski L. On practical problems with verification and validation of computational models. Archives of Civil Engineering. 2009. Vol. 55, No. 3. P. 323–346. URL: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BTB2-0058-0002>.

32. Tarczynski A., Allay N. Spectral analysis of randomly sampled signals: suppression of aliasing and sampler jitter. IEEE Transactions on Signal Processing. 2004. Vol. 52, No. 12. P. 3324–3334. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSP.2004.837436>.

33. Oberkampf W. L., Trucano T. G. Verification and validation in computational fluid dynamics. Progress in Aerospace Sciences. 2002. Vol. 38, No. 3. P. 209–272. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(02\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(02)00005-2)

34. Jachner S., van den Boogaart K. G., Petzoldt T. Statistical Methods for the Qualitative Assessment of Dynamic Models with Time Delay (R Package qualV). Journal of Statistical Software. 2007. Vol. 22, No. 8. P. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v022.i08>.

35. Li M. H. Frequency adaptability analysis of typical acoustic propagation models / M. H. Li, C. Chen, X. Feng, C. Wang, H. Wang // Frontiers in Marine Science. 2025. Vol. 12. Article 1687199. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1687199>.

36. Liemohn M. W., Shane A. D., Azari A. R., Petersen A. K., Swiger B. M., Mukhopadhyay A. RMSE is not enough: Guidelines to robust data-model comparisons for magnetospheric physics. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2021. Vol. 218. Article 105624. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105624>

37. Li J., Piwakowski B. A time-domain model and experimental validation of the acoustic field radiated by air-coupled transducers. Ultrasonics. 2018. Vol. 82. P. 114–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.07.020>

38. Zhang J., Li Y., Ali W., Liu L. Line Spectrum Enhancement of Underwater Acoustic Signals Using Kalman Filter. *Journal of Marine Science and Application*. 2020. Vol. 19. P. 148–154. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11804-020-00122-w>
39. Abraham D. A. *Underwater Acoustic Signal Processing: Modeling, Detection, and Estimation*. Cham : Springer, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92983-5>.
40. Stoica P., Moses R. L. *Spectral Analysis of Signals*. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2005.
41. Blackman R. B., Tukey J. W. *The Measurement of Power Spectra from the Point of View of Communications Engineering*. New York : Dover Publications, 1958.
42. Welch P. D. The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*. 1967. Vol. 15, No. 2. P. 70–73.
43. Percival D. B., Walden A. T. *Spectral Analysis for Physical Applications*. Cambridge : Cambridge University Press, 1993.
44. Harris F. J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*. 1978. Vol. 66, No. 1. P. 51–83.
45. Li G., Wu J., Tang T., Chen Z., Chen J., Liu H. Underwater Acoustic Time Delay Estimation Based on Envelope Differences of Correlation Functions. *Sensors*. 2019. Vol. 19, No. 5. Article 1259. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19051259>.
46. Liu K.-W., Huang C.-J., Too G.-P., Shen Z.-Y., Sun Y.-D. Underwater Sound Source Localization Based on Passive Time-Reversal Mirror and Ray Theory. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 6. Article 2420. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22062420>.
47. Van Trees H. L. *Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part I*. 2nd ed. Hoboken : Wiley, 2013.
48. Bendat J. S., Piersol A. G. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. 4th ed. Hoboken : Wiley, 2010.
49. Hayes M. H. *Statistical Digital Signal Processing and Modeling*. New York : Wiley, 1996.

50. Yerramalli S., Mitra U. Optimal Resampling of OFDM Signals for Multiscale–Multilag Underwater Acoustic Channels. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2011. Vol. 36, No. 1. P. 126–138. DOI: <https://doi.org/10.1109/JOE.2010.2093752>.
51. Oppenheim A. V., Schafer R. W., Buck J. R. *Discrete-Time Signal Processing*. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1999.
52. Proakis J. G., Manolakis D. G. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*. 4th ed. Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2007.
53. Lyons R. G. *Understanding Digital Signal Processing*. 3rd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2011.
54. Rabiner L. R., Gold B. *Theory and Application of Digital Signal Processing*. Englewood Cliffs : Prentice-Hall, 1975.
55. Ingle V. K., Proakis J. G. *Applied Digital Signal Processing: Theory and Practice*. Cambridge : Cambridge University Press, 2011.
56. Stanca R., Sârbu A. Exploring Signal Interpolation: A Comparative Study of Convolution, Regression, and SVM Methods. *Computer Networks and Communications*. 2025. Vol. 3, No. 1. P. 123–138.
57. Fernandez M. P., Kaushal S., Crockett B., Bulus-Rossini L. A., Costanzo-Caso P. A., Azaña J. All-Optical Parametric-Assisted Oversampling and Decimation for Signal Denoising Amplification. *Laser & Photonics Reviews*. 2023. Vol. 17, No. 6. Article 2200711. DOI: <https://doi.org/10.1002/lpor.202200711>.
58. Fang G. Whittaker–Kotelnikov–Shannon Sampling Theorem and Aliasing Error. *Journal of Approximation Theory*. 1996. Vol. 85, No. 2. P. 115–131. DOI: <https://doi.org/10.1006/jath.1996.0033>
59. Shannon C. E. Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*. 1949. Vol. 37, No. 1. P. 10–21.
60. Wang X. Digital Signal Processing with FIR Filter Design and Fast Fourier Transform. *Applied and Computational Engineering*. 2026. Vol. 227. P. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2026.GU32263>.

61. Cooley J. W., Tukey J. W. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. *Mathematics of Computation*. 1965. Vol. 19, No. 90. P. 297–301. DOI: <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1>.
62. Frigo M., Johnson S. G. The design and implementation of FFTW3. *Proceedings of the IEEE*. 2005. Vol. 93, No. 2. P. 216–231. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2004.840301>
63. Agarwal P., Singh S. P., Pandey V. K. Mathematical analysis of Blackman window function in fractional Fourier transform domain. 2014 International Conference on Medical Imaging, m-Health and Emerging Communication Systems (MedCom). Greater Noida, India, 2014. P. 120–125. DOI: <https://doi.org/10.1109/MedCom.2014.7005988>.
64. Xie J. Analysis of Common Window Function Selection Strategies for FIR Filter Design Using Window Function Methods. *Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection*. 2026. Vol. 3, No. 13. DOI: <https://doi.org/10.61173/mvydq530>.
65. Wadayama T., Nakai-Kasai A. Mean Squared Error Analysis of Noisy Average Consensus. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*. 2025. Vol. E108-A, No. 3. P. 435–441. DOI: <https://doi.org/10.1587/transfun.2024TAP0006>.
66. Nguyen-Duy T., Ngo-Duc T., Choisy M. et al. Performance and added value of a high-resolution (2 km) rainfall product based on WRF-downscaled ERA5 for Ho Chi Minh City, Vietnam. *Theoretical and Applied Climatology*. 2025. Vol. 156. Article 656. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05894-1>.
67. Rossing T. D. Introduction to acoustics. *Springer Handbook of Acoustics* / ed. by T. D. Rossing. 2nd ed. New York : Springer, 2014. P. 1–8.
68. Au W. W. L., Hastings M. C. *Principles of Marine Bioacoustics*. New York : Springer, 2008.
69. Treeby B. E., Cox B. T. k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields. *Journal of Biomedical Optics*. 2010. Vol. 15, No. 2. Article 021314.

70. Treeby B. E., Jaros J., Rendell A. P., Cox B. T. Modeling nonlinear ultrasound propagation in heterogeneous media with power law absorption using k-Wave. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012. Vol. 131, No. 6. P. 4324–4336.

71. Courant R., Friedrichs K., Lewy H. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik. *Mathematische Annalen*. 1928. Bd. 100. S. 32–74. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01448839>.

72. Francois R. E., Garrison G. R. Sound absorption based on ocean measurements: Part I: Pure water and magnesium sulfate contributions. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1982. Vol. 72, No. 3. P. 896–907.

73. Kluyver T. et al. Jupyter Notebooks — a publishing format for reproducible computational workflows. *Positioning and Power in Academic Publishing: Players, Agents and Agendas*. Amsterdam : IOS Press, 2016. P. 87–90. DOI: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-649-1-87>.

74. The SWellEx-96 Experiment (UCSD). Data and documentation portal. URL: <https://swellex96.ucsd.edu/> (дата звернення: 09.03.2026).

75. Calisphere / UC San Diego Library. SWellEx-96 collection. URL: <https://calisphere.org/collections/26185/> (дата звернення: 09.03.2026).

76. Buckingham M. J. Ocean-acoustic propagation models. *Journal d'Acoustique*. 1992. Vol. 5, No. 3. P. 223–287.

77. Spiesberger J. L., Metzger K. A new algorithm for sound speed in seawater. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1991. Vol. 89. P. 2677–2688.

78. k-Wave-python documentation. URL: <https://k-wave-python.readthedocs.io/en/latest/> (дата звернення: 09.03.2026).

79. k-Wave-python source repository. URL: <https://github.com/waltsims/k-wave-python> (дата звернення: 09.03.2026).

80. Berenger J.-P. A Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves. *Journal of Computational Physics*. 1994. Vol. 114. P. 185–200.

81. Harris C. R. et al. Array programming with NumPy. *Nature*. 2020. Vol. 585. P. 357–362. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>.

82. Virtanen P. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing

in Python. *Nature Methods*. 2020. Vol. 17, No. 3. P. 261–272. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>.

83. McKinney W. Data structures for statistical computing in Python. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. 2010. P. 56–61. DOI: <https://doi.org/10.25080/Majora-92bf1922-00a>.

84. Hunter J. D. Matplotlib: a 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*. 2007. Vol. 9, No. 3. P. 90–95. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>.

85. Kay S. M. *Fundamentals of Statistical Signal Processing. Vol. I: Estimation Theory*. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1993.

86. Priestley M. B. *Spectral Analysis and Time Series*. London : Academic Press, 1981.

87. Kay S. M. *Modern Spectral Estimation: Theory and Application*. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1988. 543 p.

88. Mitra S. K. *Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach*. 4th ed. New York : McGraw-Hill, 2011.

89. Marple S. L. *Digital Spectral Analysis with Applications*. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1987.

90. Mallat S. *A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparse Way*. 3rd ed. Burlington : Academic Press, 2009.

91. Cohen L. *Time-Frequency Analysis*. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1995.

92. Allen J. B., Rabiner L. R. A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis. *Proceedings of the IEEE*. 1977. Vol. 65, No. 11. P. 1558–1564.

93. Boashash B. (ed.). *Time-Frequency Signal Analysis and Processing: A Comprehensive Reference*. 2nd ed. Amsterdam : Elsevier, 2016.

94. Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. 376 p.

95. Hlawatsch F., Flandrin P. The interference structure of the Wigner distribution and related time-frequency signal representations. *The Wigner Distribution: Theory and Applications in Signal Processing* / ed. by W. Mecklenbräuker, F. Hlawatsch. Amsterdam : Elsevier, 1997. P. 59–133.

96. Griffin D. W., Lim J. S. Signal estimation from modified short-time Fourier transform. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1984. Vol. 32, No. 2. P. 236–243. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASSP.1984.1164317>.
97. Flandrin P. *Time-Frequency/Time-Scale Analysis*. San Diego : Academic Press, 1999.
98. Percival D. B., Walden A. T. *Wavelet Methods for Time Series Analysis*. Cambridge : Cambridge University Press, 2000.
99. Kristeková M., Kristek J., Moczo P. Time-frequency misfit and goodness-of-fit criteria for quantitative comparison of time signals. *Geophysical Journal International*. 2009. Vol. 178, No. 2. P. 813–825.
100. Liu Y.-W. *Hilbert Transform and Applications. Fourier Transform Applications*. London : InTech, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5772/37727>.
101. Oberkamp W. L., Roy C. J. *Verification and Validation in Scientific Computing*. Cambridge : Cambridge University Press, 2010.
102. Coleman H. W., Steele W. G. *Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers*. 3rd ed. Hoboken : Wiley, 2009.
103. Roache P. J. *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. Albuquerque : Hermosa Publishers, 1998.
104. ASME V&V 20-2009. *Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer*. New York : ASME, 2009.
105. ASME V&V 10-2006. *Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics*. New York : ASME, 2006.
106. NASA-STD-7009A. *Standard for Models and Simulations*. Washington, DC : National Aeronautics and Space Administration, 2016.
107. Rule A. et al. Ten simple rules for writing and sharing computational analyses in Jupyter Notebooks. *PLOS Computational Biology*. 2019. Vol. 15, No. 7.
108. Pimentel J. F., Murta L., Braganholo V., Freire J. A large-scale study about quality and reproducibility of Jupyter Notebooks. *Proceedings of the 16th International Conference on Mining Software Repositories (MSR)*. 2019. P. 507–517.
109. Perkel J. M. Why Jupyter is data scientists' computational notebook of choice.

Nature. 2018. Vol. 563. P. 145–146. DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07196-1>.

110. Noble W. S. A Quick Guide to Organizing Computational Biology Projects. PLOS Computational Biology. 2009. Vol. 5, No. 7. Article e1000424. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1000424>.

111. Wilson G. et al. Best practices for scientific computing. PLOS Biology. 2014. Vol. 12, No. 1.

112. Sandve G. K. et al. Ten simple rules for reproducible computational research. PLOS Computational Biology. 2013. Vol. 9, No. 10.

113. Stodden V., Leisch F., Peng R. D. (eds.). Implementing Reproducible Research. Boca Raton : CRC Press, 2014.

114. Peng R. D. Reproducible Research in Computational Science. Science. 2011. Vol. 334, No. 6060. P. 1226–1227. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1213847>.

115. Yale Law School Roundtable on Data and Code Sharing. Reproducible Research: Addressing the Need for Data and Code Sharing in Computational Science. Computing in Science & Engineering. 2010. Vol. 12, No. 5. P. 8–13. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCSE.2010.113>.

116. Schwab M., Karrenbach M., Claerbout J. Making scientific computations reproducible. Computing in Science & Engineering. 2000. Vol. 2, No. 6. P. 61–67.

117. Wilson W. D. Speed of sound in distilled water as a function of temperature and pressure. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1959. Vol. 31. P. 1067–1072.

118. Wilson W. D. Speed of sound in sea water as a function of temperature, pressure, and salinity. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1960. Vol. 32. P. 641–644.

119. Matplotlib: Visualization with Python. Matplotlib documentation. The Matplotlib Development Team. URL: <https://matplotlib.org/> (дата звернення: 06.03.2026).

120. Booch G., Rumbaugh J., Jacobson I. The Unified Modeling Language User Guide. 2nd ed. Boston : Addison-Wesley, 2005. 496 p.

121. Hassan M. U., Bao Q. A Field Calibration Method for Low-Cost MEMS Accelerometer Based on the Generalized Nonlinear Least Square Method. *Multiscale Science and Engineering*. 2020. Vol. 2. P. 135–142. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42493-020-00045-2>.

122. Hassija V., Chamola V., Mahapatra A. et al. Interpreting Black-Box Models: A Review on Explainable Artificial Intelligence. *Cognitive Computation*. 2024. Vol. 16. P. 45–74. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12559-023-10179-8>.

123. ДСТУ ISO/IEC/IEEE 16326:2015. Розроблення систем та програмного забезпечення. Процеси життєвого циклу. Керування проектами (ISO/IEC/IEEE 16326:2009, IDT). [Чинний від 2016-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.

124. ISO/IEC/IEEE 29148:2018. Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering. Geneva : ISO, 2018.

125. ISO 18405:2017. Underwater acoustics — Terminology. Geneva : International Organization for Standardization, 2017.

126. Oppenheim A. V., Schafer R. W. Discrete-Time Signal Processing. 3rd ed. Upper Saddle River : Pearson, 2010. 1108 p.

127. Crochiere R. E., Rabiner L. R. Multirate Digital Signal Processing. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1983. 411 p.

128. Kristeková M., Kristek J., Moczo P., Day S. M. Misfit Criteria for Quantitative Comparison of Seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2006. Vol. 96, No. 5. P. 1836–1850. DOI: <https://doi.org/10.1785/0120060012>.

129. Haykin S. Adaptive Filter Theory. 5th ed. Harlow : Pearson, 2014.

130. Orfanidis S. J. Introduction to Signal Processing. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1995.

131. Papoulis A. Signal Analysis. New York : McGraw-Hill, 1977.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Гейко О. О. Забезпечення правильності комп'ютерних моделей через верифікацію та валідацію. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. 2023. Том 34(73). № 4. С. 30–37.

Здобувачем проаналізовано підходи до забезпечення правильності комп'ютерних моделей через процедури верифікації та валідації, узагальнено їх відмінності, призначення та місце у життєвому циклі програмного забезпечення. У роботі сформовано основні положення щодо використання верифікації та валідації для підвищення достовірності результатів моделювання.

2. Гейко О. О., Варава І. А. Еталонна архітектура для програмної платформи верифікації математичних моделей. Наукові праці Міжрегіональної академії управління персоналом. Інформаційні технології та суспільство. 2024. Вип. 2(13). С. 17–25.

Здобувач запропонував архітектурну структуру програмної платформи верифікації математичних моделей, визначив склад основних модулів, їх взаємодію та функціональне призначення. Також здобувачем підготовлено основний текст статті та обґрунтовано доцільність модульної побудови програмної системи.

3. Гейко О. О., Варава І. А. Особливості програмних рішень в області верифікації і валідації чисельних моделей. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2025.

Здобувачем виконано аналіз програмних рішень у сфері верифікації та валідації чисельних моделей, узагальнено вимоги до програмних засобів цього класу та визначено їх характерні особливості. У роботі підготовлено основний текст статті та сформовано порівняльну характеристику наявних підходів.

4. Гейко О. О., Варава І. А., Пуха Г. С., Дембіцький В. В., Вдовина А. В. Метод валідації чисельних моделей поширення гідроакустичних хвиль з узгодженням частот дискретизації та спектральної оцінки. Системні технології.

Здобувачем розроблено основний метод валідації чисельних моделей за натурними даними, що включає узгодження частот дискретизації, ресемплінг, спектральне виділення корисної складової та статистичне оцінювання узгодженості результатів. Здобувач також підготував основний текст статті та обґрунтував послідовність етапів алгоритму валідації.

5. Гейко О. О. Методи валідації математичних моделей. XX Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (25–28 квітня 2023 р.).

Здобувачем сформульовано загальні підходи до валідації математичних моделей, визначено актуальність проблеми та окреслено напрями подальших досліджень у цій предметній області. У тезах відображено вихідні положення дисертаційного дослідження.

6. Гейко О. О., Варава І. А. Валідація математичних моделей статистичним методом. Збірник матеріалів III Міжнародної науково-технічної конференції «Системи і технології зв'язку, інформатизації та кібербезпеки: актуальні питання і тенденції розвитку». Київ, 30 листопада 2023 року. Київ: Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут, 2023. С. 110–111.

Здобувачем сформульовано статистичний підхід до валідації математичних моделей, підготовлено матеріали доповіді та узагальнено основні результати застосування статистичних критеріїв для оцінювання узгодженості даних. У роботі відображено розвиток методичного апарату валідації.

7. Гейко О. О., Варава І. А. Проблематика валідації математичних моделей. Збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 125-й річниці КПІ ім. Ігоря Сікорського «Сучасні аспекти інженерії програмного забезпечення».

Здобувачем виконано постановку проблеми валідації математичних моделей, узагальнено основні труднощі практичного застосування процедур перевірки та

обґрунтовано необхідність створення спеціалізованих програмних засобів. У тезах визначено проблемне поле дисертаційного дослідження.

8. Гейко О. О., Варава І. А. Інструменти представлення математичних формул в програмному забезпеченні. Збірник матеріалів 2-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні аспекти інженерії програмного забезпечення».

Здобувачем виконано аналіз інструментів подання математичних формул у програмному забезпеченні, систематизовано вимоги до їх використання та визначено особливості застосування таких засобів у науковому й інженерному програмному забезпеченні. У роботі підготовлено основний зміст тез та узагальнено результати аналізу.

ДОДАТОК Б

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ В НДЧ

“ЗАТВЕРДЖУЮ”



Проректор з наукової роботи
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Сергій СТИРЕНКО

«27» 03 2026 року

АКТ

про реалізацію результатів дисертаційної роботи **ГЕЙКА Олега Олександровича** на тему *«Методи та програмні засоби валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль для програмно-апаратних комплексів»*

Результати наукових досліджень ГЕЙКА Олега Олександровича, а саме методи валідації математичних моделей та підбору оптимальних параметрів моделювання використано в науково-дослідних роботах та господарських договорах, що ведуться в Особливому конструкторському бюро «ШТОРМ» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Дані методи були реалізовані у вигляді програмного забезпечення, що дозволяє проводити валідацію математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль, яка базується на автоматизованому узгодженні частот дискретизації модельних і експериментальних сигналів, а також визначати оптимальні конфігурації параметрів та області їх допустимих значень для дискретної математичної моделі розповсюдження акустичних хвиль в програмно-апаратних комплексах.

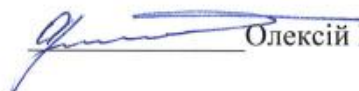
Результати наукових досліджень ГЕЙКА Олега Олександровича використовувалися зокрема при виконанні таких договорів КПІ ім. Ігоря Сікорського:

- Дндч/05.02.05/248/24 від 12.12.2024:
при наданні наукових послуг з тестування програмного забезпечення (ПЗ) моделювання даних в лабораторії Замовника, верифікації функцій ПЗ Замовника, адаптації алгоритмів моделювання даних телеметрії Замовника;

- Дндч/05.02.05/196/24 від 11.20.2024:
при наданні наукових послуг з розробки підпрограм моделюючого комплексу (МК) для генерації математичних характеристик шарувато-неоднорідного середовища, розробки підпрограм МК для генерації та аналізу звукових сигналів для методу кінцевих об'ємів.

Цей акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Директор особливого
конструкторського бюро «Шторм»

 Олексій КРАТКО

Професор кафедри Інженерії
програмного забезпечення в
енергетиці НН ІАТЕ

 Олександр КОВАЛЬ

Доцент кафедри Інженерії
програмного забезпечення в
енергетиці НН ІАТЕ

 Іван ВАРАВА

Аспірант кафедри Інженерії
програмного забезпечення в
енергетиці НН ІАТЕ

 Олег ГЕЙКО

ДОДАТОК В

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС



ПРИТВЕРДЖУЮ
професор з навчальної роботи
КПІ ім. Ігоря Сікорського,
кандидат технічних наук, доцент

Тетяна ЖЕЛЯСКОВА

27 КВІ 2026

2026 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційного дослідження аспіранта кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці, навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики Гейка Олега Олександровича за темою «Методи та програмні засоби валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль для програмно-апаратних комплексів» на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» в освітній процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Комісія у складі:

- голови комісії, в. о. завідувача кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці, професора, д. т. н. Федорової Н. В.;
- професора, д. т. н. Гаврилка С. В.;
- доцента, к. т. н. Кузьмініх В. О.;
- доцента, к.ф.-м.н. Свинчук О. В.

засвідчує, що результати дисертаційного дослідження Гейка Олега Олександровича на тему «Методи та програмні засоби валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль для програмно-апаратних комплексів», а саме: розроблені теоретичні підходи до побудови та валідації дискретних математичних моделей, впроваджено у лекційні та практичні заняття навчальної дисципліни «Математичне моделювання та оптимізація процесів і систем в енергетиці» (посилання на силабус: <https://surl.li/scuclt>), для студентів спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП «Інженерія програмного забезпечення інтелектуальних кібер-фізичних систем в енергетиці».

Лекція №1: «Класифікація моделей. Математичні моделі на основі потоків подій».

Практичне заняття №1: «Побудова математичних моделей на основі випадкових процесів для моделювання процесів енергетики».

Впровадження результатів дисертаційного дослідження у навчальний процес позитивно вплинуло на рівень підготовки студентів, сприяло розвитку їх аналітичного мислення та практичних компетентностей у сфері математичного моделювання, зокрема в галузі енергетики. Отримані знання та навички є актуальними та затребуваними для подальшої професійної діяльності майбутніх фахівців.

В. о. завідувача кафедри

інженерії програмного забезпечення в енергетиці,

доктор технічних наук, професор

 Наталія ФЕДОРОВА

Професор, д. т. н.

 Євген ГАВРИЛКО

Доцент, к. т. н.

 Валерій КУЗЬМІНИХ

Доцент, к.ф.-м.н.

 Ольга СВИНЧУК

ДОДАТОК Г

ЛІСТИНГИ КОДУ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

У цьому додатку наведені фрагменти коду реалізації розроблених методів в програмному забезпеченні, написані мовою програмування C#.

```
using System;

using System.Linq;

using System.Numerics;

using System.Collections.Generic;

namespace HyDroLib._18053
{
    public interface IAcousticSimulator
    {
        float[] Simulate(double sourceFreq, double fsOut, int n, int ppw);
    }

    public sealed class ValidationResult
    {
        public double Fout, AExp, AModel, DeltaE, K, MSE, PhaseIndicator;
        public bool UsefulComponentDetected, PhaseOk, GridOk, CflOk, Hp1Confirmed;
        public string Conclusion = "";
    }

    public sealed class ConfigResult
    {
        public int Ppw;
        public double Dx, Dt, EstimatedTime, EstimatedMemory, MSE;
        public bool GridOk, CflOk, AccurateEnough, FitsResources, Hp2Confirmed;
        public string Conclusion = "";
    }

    public static class HpValidation
```

```

{
    const double EPS = 1e-12;

    // ----- HP1 -----

    public static ValidationResult ValidateHp1(
        float[] experimental, double fsExp,
        float[] modeled, double fsModel,
        double sourceFreq, int n,
        double dx, double dt, double c,
        double cflMax = 1.0, double mseThreshold = 0.05)
    {
        double fout = SelectFout(sourceFreq);

        float[] x = Normalize(Resample(experimental, fsExp, fout), n);
        float[] y = Normalize(Resample(modeled, fsModel, fout), n);

        double ax = SpectralAmplitude(x, fout, sourceFreq);
        double ay = SpectralAmplitude(y, fout, sourceFreq);
        double php = PhaseIndicator(x, y, fout, sourceFreq);

        bool useful = ax > EPS && ay > EPS;
        bool phaseOk = php >= 0.0;

        double deltaE = ax - ay;
        double k = ay > EPS ? ax / ay : double.PositiveInfinity;
        double mse = Mse(x, y);

        bool gridOk = (c / sourceFreq) / dx >= 6.0;
        bool cflOk = (c * dt / dx) <= cflMax && dt <= dx / (c * Math.Sqrt(3.0));

        bool ok = useful && phaseOk && gridOk && cflOk && mse <= mseThreshold;

        return new ValidationResult
        {

```

```

        Fout = fout,
        AExp = ax,
        AModel = ay,
        DeltaE = deltaE,
        K = k,
        MSE = mse,
        PhaseIndicator = php,
        UsefulComponentDetected = useful,
        PhaseOk = phaseOk,
        GridOk = gridOk,
        CflOk = cflOk,
        Hp1Confirmed = ok,
        Conclusion = ok

        ? "HP1 підтверджено: модель узгоджується з експериментальними
даними."

        : "HP1 не підтверджено: не виконано умови спектральної, фазової
або чисельної коректності."

    };
}

// ----- HP2 -----
public static ConfigResult FindBestConfigHp2(
    float[] experimental, double fsExp,
    IAcousticSimulator simulator,
    double sourceFreq, int n, double c,
    int[] ppwList,
    double cfl, double maxTime, double maxMemory,
    double mseThreshold = 0.05)
{
    ConfigResult best = null;

    foreach (int ppw in ppwList)
    {
        double lambda = c / sourceFreq;
        double dx = lambda / ppw;

```

```

double dt = cfl * dx / c;

double estTime = EstimateTime(n, ppw);
double estMem = EstimateMemory(n, ppw);

float[] modeled = simulator.Simulate(sourceFreq,
SelectFout(sourceFreq), n, ppw);

var vr = ValidateHp1(
    experimental, fsExp,
    modeled, SelectFout(sourceFreq),
    sourceFreq, n, dx, dt, c, cfl, mseThreshold);

bool fitsResources = estTime <= maxTime && estMem <= maxMemory;
bool accurate = vr.MSE <= mseThreshold;
bool hp2 = vr.GridOk && vr.CflOk && accurate && fitsResources;

var cfg = new ConfigResult
{
    Ppw = ppw,
    Dx = dx,
    Dt = dt,
    EstimatedTime = estTime,
    EstimatedMemory = estMem,
    MSE = vr.MSE,
    GridOk = vr.GridOk,
    CflOk = vr.CflOk,
    AccurateEnough = accurate,
    FitsResources = fitsResources,
    Hp2Confirmed = hp2,
    Conclusion = hp2
        ? "HP2 підтверджено: конфігурація належить до області
допустимих параметрів."
        : "HP2 не підтверджено: конфігурація не задовольняє критерії
точності, коректності або ресурсів."

```

```

};

    if (cfg.Hp2Confirmed &&
        (best == null || cfg.EstimatedTime < best.EstimatedTime ||
         (Math.Abs(cfg.EstimatedTime - best.EstimatedTime) < EPS &&
          cfg.MSE < best.MSE)))
        best = cfg;
    }

    return best ?? new ConfigResult
    {
        Conclusion = "Допустимої конфігурації для HP2 не знайдено."
    };
}

// ----- Підготовка даних -----
static double SelectFout(double fs)
{
    double fout = 1.0;
    while (fout < fs) fout *= 2.0;
    return fout;
}

static float[] Resample(float[] input, double fin, double fout)
{
    if (input.Length == 0) return Array.Empty<float>();
    if (Math.Abs(fin - fout) < EPS) return input.ToArray();

    int m = Math.Max(1, (int)Math.Round(input.Length * fout / fin));
    float[] y = new float[m];

    for (int i = 0; i < m; i++)
    {
        double p = i * fin / fout;
        int i0 = (int)Math.Floor(p);

```

```

        int i1 = Math.Min(i0 + 1, input.Length - 1);

        double a = p - i0;

        y[i] = (float)((1 - a) * input[i0] + a * input[i1]);
    }

    return y;
}

static float[] Normalize(float[] x, int n)
{
    x = FixLength(x, n);

    float min = x.Min(), max = x.Max();

    if (Math.Abs(max - min) < EPS) return x.Select(_ => 0f).ToArray();

    return x.Select(v => (float)((v - min) / (max - min))).ToArray();
}

static float[] FixLength(float[] x, int n)
{
    if (x.Length == n) return x.ToArray();

    if (x.Length > n) return x.Take(n).ToArray();

    float[] y = new float[n];

    Array.Copy(x, y, x.Length);

    return y;
}

// ----- Спектральний аналіз -----
static double SpectralAmplitude(float[] x, double fs, double f0)
{
    int n = x.Length;

    double[] w = Blackman(n);

    Complex[] s = new Complex[n];

    for (int i = 0; i < n; i++) s[i] = new Complex(x[i] * w[i], 0);

    Complex[] X = Dft(s);

```

```

        int k = (int)Math.Round(f0 * n / fs);

        k = Math.Max(0, Math.Min(k, n - 1));

        return X[k].Magnitude;
    }

    static double PhaseIndicator(float[] x, float[] y, double fs, double f0)
    {
        int n = x.Length;

        double[] w = Blackman(n);

        Complex[] sx = new Complex[n];
        Complex[] sy = new Complex[n];

        for (int i = 0; i < n; i++)
        {
            sx[i] = new Complex(x[i] * w[i], 0);
            sy[i] = new Complex(y[i] * w[i], 0);
        }

        Complex[] X = Dft(sx);
        Complex[] Y = Dft(sy);

        int k = (int)Math.Round(f0 * n / fs);

        k = Math.Max(0, Math.Min(k, n - 1));

        return (X[k] * Complex.Conjugate(Y[k])).Real;
    }

    static double Mse(float[] x, float[] y)
    {
        int n = Math.Min(x.Length, y.Length);

        if (n == 0) return 0.0;

        double s = 0;

        for (int i = 0; i < n; i++) s += (x[i] - y[i]) * (x[i] - y[i]);

        return s / n;
    }

```

```

}

static double[] Blackman(int n)
{
    if (n <= 1) return Enumerable.Repeat(1.0, Math.Max(n, 1)).ToArray();
    double[] w = new double[n];
    for (int i = 0; i < n; i++)
        w[i] = 0.42 - 0.5 * Math.Cos(2 * Math.PI * i / (n - 1))
            + 0.08 * Math.Cos(4 * Math.PI * i / (n - 1));
    return w;
}

static Complex[] Dft(Complex[] x)
{
    int n = x.Length;
    Complex[] y = new Complex[n];

    for (int k = 0; k < n; k++)
    {
        Complex sum = Complex.Zero;
        for (int t = 0; t < n; t++)
        {
            double a = -2.0 * Math.PI * t * k / n;
            sum += x[t] * Complex.FromPolarCoordinates(1.0, a);
        }
        y[k] = sum;
    }
    return y;
}

// ----- Оцінка ресурсів -----
static double EstimateTime(int n, int ppw) => 0.001 * n * ppw;
static double EstimateMemory(int n, int ppw) => 0.0005 * n * ppw;
}

```

```

// Заглушка симулятора

public sealed class DummySimulator : IAcousticSimulator
{
    public float[] Simulate(double sourceFreq, double fsOut, int n, int ppw)
    {
        float[] y = new float[n];
        double atten = 1.0 - 0.02 * Math.Max(0, 20 - ppw);

        for (int i = 0; i < n; i++)
        {
            double t = i / fsOut;
            y[i] = (float)(atten * Math.Sin(2 * Math.PI * sourceFreq * t) *
Math.Exp(-2.0 * t));
        }
        return y;
    }
}

```

ДОДАТОК Д

Ілюстрації інтерфейсу програмного засобу валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль

HAS, Hz: 2000 AVc, Hz: 250 BallHMc, Hz: 1000 BotHMc, Hz: 9.1

Needed Samples in 1 sec: 128

AHRS parameters

☐ Using Ball AHRS for HAS data recalculate ☐ Using Bott AHRS for HAS data recalculate

☒ Using 6DOF AHRS ☐ Using 9DOF AHRS ☒ Using 6DOF AHRS ☐ Using 9DOF AHRS

Fourier parameters

Precision Rate: 6 Overlap: 128 Left Border, Hz: 0 Right Border, Hz: 128

Import File with parameters without Saving Import File and Save Pre-processing Results with Parameters ☒ Save HAS data ☐ Save Telemetry data

The Ball calibration Parameters **The Base calibration Parameters**

The Ball Accelerometer sensor calibration Parameters

☐ use offset and gain coefficient ☐ use gain coefficient

X Offset: -3524 X Scale: 6.103515625E-05

Y Offset: 2511 Y Scale: 6.103515625E-05

Z Offset: -15353 Z Scale: 6.103515625E-05

The Ball Angular velocity sensor calibration Parameters

☐ use offset and gain coefficient ☐ use gain coefficient

X Offset: 210 X Scale: 0.00762939453125

Y Offset: -12 Y Scale: 0.00762939453125

Z Offset: -49 Z Scale: 0.00762939453125

The Ball Magnetimetr sensor calibration Parameters

☐ use offset coefficient ☐ use gain coefficient

X Offset: 0 X Scale: 1.1920928955078125E-07

Y Offset: 0 Y Scale: 1.1920928955078125E-07

Z Offset: 0 Z Scale: 1.1920928955078125E-07

Рисунок Д.1 – Форма параметрів під час відкриття файлу для читання

Region of working with parameters for the Calculation

Change Parametrs for Data Generation

Region of the Calculation

Start Calculation

☐ Generate Acoustic

Рисунок Д.2 – Елемент управління контролем виконання обчислень

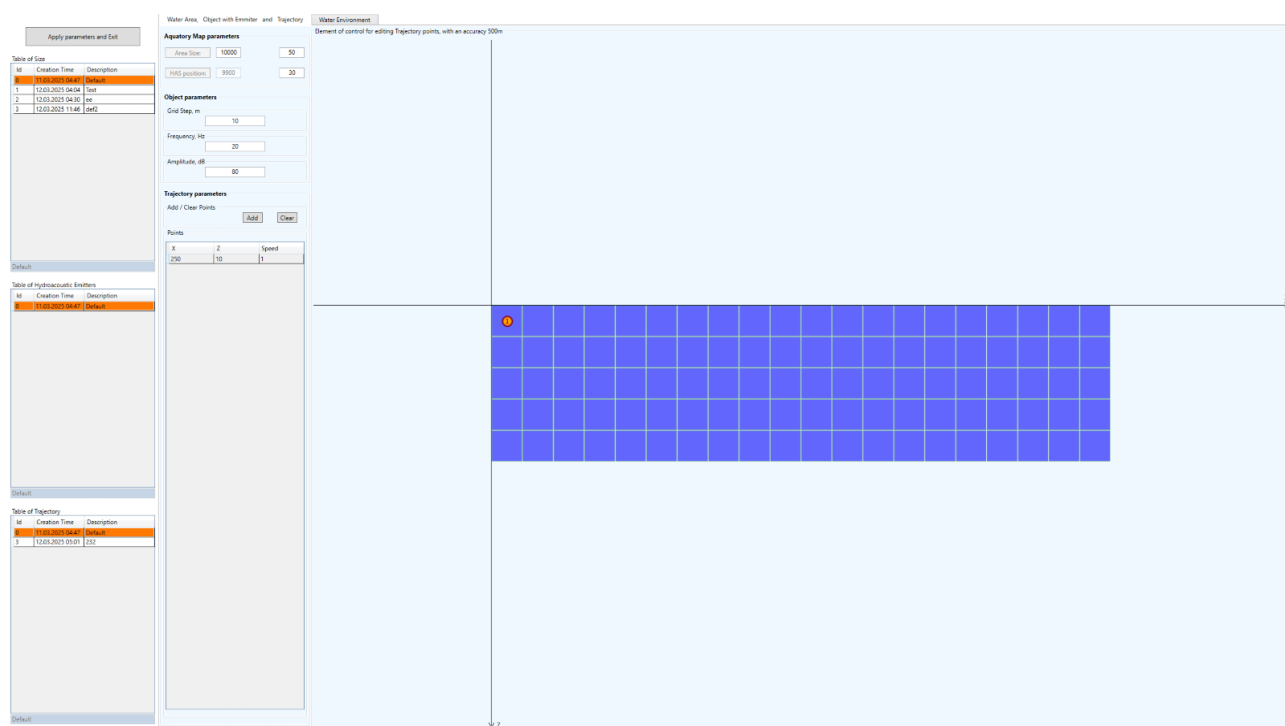


Рисунок Д.3 – Форма для зміни параметрів моделювання

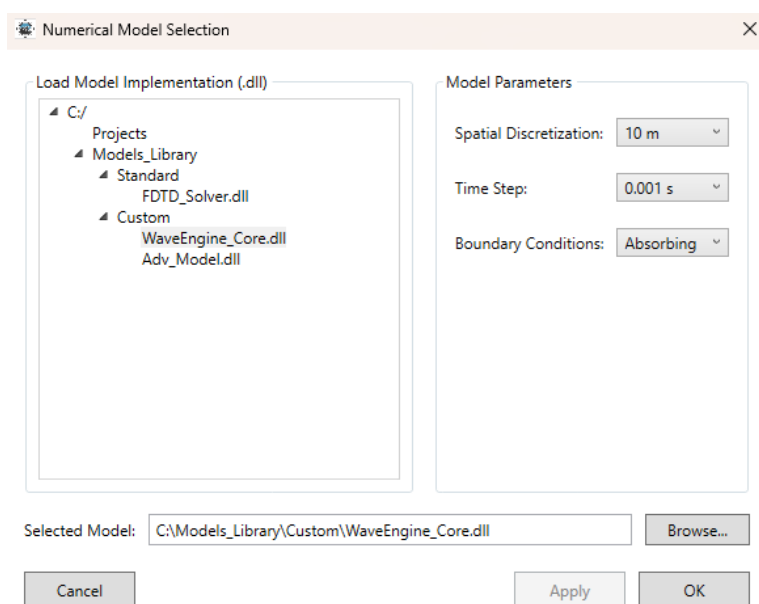


Рисунок Д.4 – Інтерфейс вибору чисельної моделі

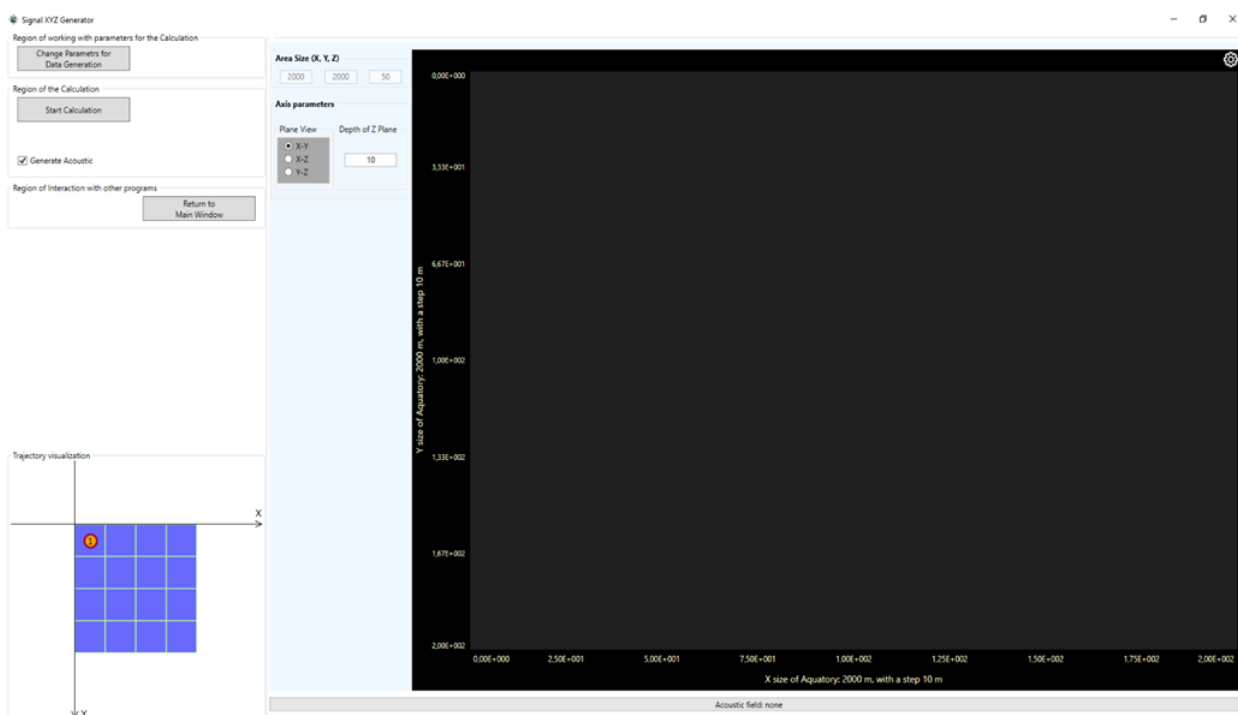


Рисунок Д.5 – Робоче вікно модуля генерації під час підготовки та виконання обчислювального експерименту