

УДК 519.876.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.1/06>

Гейко О.О.

<https://orcid.org/0009-0006-3279-8274>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Варава І.А.

<https://orcid.org/0000-0001-9874-016X>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пуха Г.С.

<https://orcid.org/0000-0001-5728-1577>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Дембіцький В.В.

<https://orcid.org/0009-0004-4119-4742>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вдовина А.В.

<https://orcid.org/0009-0001-1116-708X>

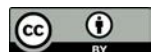
Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВАЛІДАЦІЇ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

У статті описано підхід до створення програмної платформи для верифікації та валідації (V&V) математичних і чисельних моделей, яка автоматизує порівняння двох залежностей - отриманої з експерименту та сформованої в результаті моделювання [3,10]. Запропоноване програмне забезпечення орієнтоване на інженерні задачі, де надійність висновків суттєво залежить від об'єктивності процедури порівняння, а «візуальна оцінка» є недостатньою через суб'єктивність та різну інтерпретацію форм сигналів [5,7]. Платформа реалізує типову послідовність V&V: імпорт даних, керувану попередню обробку (фільтрацію, узгодження дискретизації, синхронізацію в часі та обрізку), обчислення набору детерміністичних метрик подібності форми та подання результатів у графічному інтерфейсі. Окремо висвітлено архітектуру програмного комплексу валідації, що включає підсистему взаємодії з сенсорними даними (розбір пакетів, відокремлення телеметрії та акустичних компонент, калібрування АНРС), підсистему моделювання та керування експериментами, контур аналізу параметрів і формування області параметрів, підсистему валідації з переходом у частотну область та розрахунком метрик, а також модулі візуалізації часових і спектральних представлень [11]. Для забезпечення відтворюваності процедура порівняння супроводжується фіксацією налаштувань попередньої обробки, параметрів моделі та умов експерименту, що дає змогу повторювати серії запусків і коректно зіставляти результати між різними сценаріями. Оцінювання подібності здійснюється як у часовій області (для контролю форми й синхронності сигналів), так і у спектральній (для аналізу частотного складу), що підвищує інформативність висновків у випадках наявності шумів або нестационарності процесів [5,7]. Результати обчислень зберігаються у форматах, придатних для звітності та подальшого аналізу (табличні дані та растрові графіки), а також можуть бути використані для порівняння альтернативних конфігурацій моделі та налаштувань обчислювального експерименту. Запропонований підхід зменшує ризик людських помилок, прискорює повторювані цикли V&V і підвищує довіру до моделей у процесі ухвалення інженерних рішень [10].

Ключові слова: верифікація, валідації, чисельне моделювання, порівняння часових залежностей, метрики подібності, попередня обробка сигналів, частотний аналіз, архітектура ПЗ.



Постановка проблеми. У багатьох прикладних галузях інженерії якість рішень залежить від того, наскільки точно чисельна модель відтворює реальну поведінку об'єкта чи процесу [3,10]. Типовим способом перевірки адекватності є порівняння часових рядів або сигналів: експериментального та розрахункового. Проте на практиці часто застосовують візуальну оцінку - аналіз піків, фазових зсувів, форми коливань [5,7]. Такий підхід не гарантує відтворюваності: різні фахівці можуть робити різні висновки за однакових даних, а формалізувати критерії прийнятності результату складно.

Отже, актуальною є задача розробки програмного інструмента, який переводить порівняння залежностей у площину формалізованих, кількісних показників, забезпечує повторюваність процедури та зручну інтерпретацію результатів у контексті V&V [7,9]. Концептуальні засади еталонної архітектури програмної платформи для такого класу задач наведено в [13].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних підходах V&V розрізняють два взаємодоповнювальні процеси: верифікацію (перевірку правильності реалізації математичної постановки та її чисельного розв'язання) і валідацію (оцінювання того, наскільки модель відповідає реальному світу в межах запланованого застосування). У рекомендаціях професійних спільнот ці поняття визначаються як базові етапи життєвого циклу комп'ютерного моделювання і є критичними для підвищення довіри до результатів, особливо в задачах із високими вимогами до безпеки та відповідальності рішень [9,10].

Окрема гілка досліджень присвячена метрикам порівняння залежностей, які дають числову оцінку подібності. Описані підходи включають метрики, що розділяють вплив амплітуди (величини) та фази/часового зсуву; інтегральні та точкові показники розбіжності; статистичні тести на основі аналізу варіацій, які інтерпретують залишок як шум за умови «однаковості» події [6,7].

Разом із тим практичне застосування таких метрик вимагає коректної підготовки даних: часто експеримент і модель мають різні частоти дискретизації, стартові моменти, довжини записів, а також різний рівень шуму. Тому програмні рішення в цій сфері мають поєднувати модулі попередньої обробки сигналів, обчислення метрик і засоби інтерпретації/візуалізації результатів. Для інженерних задач, зокрема у гідроакустичних вимірюваннях, це проявляється як принципова неузгодженість дискретизації: сенсор

фіксує сигнал з апаратно заданою частотою, тоді як часовий крок моделювання визначається умовами стійкості, параметрами розрахункової сітки та властивостями середовища. Тому ключовою є процедура узгодження дискретизації та часової прив'язки (ресемплінг/синхронізація) без втрати фізичного змісту сигналів.

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення та реалізація програмної платформи для параметричного аналізу моделей із можливістю: (1) імпорту/зберігання та попередньої обробки даних моделювання й експерименту (синхронізація, ресемплінг, фільтрація); (2) виконання процедур верифікації та валідації з використанням метрик відповідності; (3) організації параметричних досліджень у вигляді black-box оптимізації для пошуку області параметрів Ω , що забезпечує прийнятну узгодженість моделі та експерименту; (4) формування звітів та візуалізації результатів.

Виклад основного матеріалу. Робочий процес будується як послідовність кроків: (а) завантаження даних; (б) узгодження та очищення сигналів; (в) розрахунок метрик; (г) інтерпретація і збереження результатів. Після введення двох кривих система автоматично виконує підготовчі операції, а потім формує набір метрик подібності і наочні графіки, що дозволяє швидко оцінити, наскільки модель відтворює експеримент.

Щоб метрики працювали коректно, криві потрібно зробити порівнюваними [7].

Фільтрація. Для зменшення впливу шумів застосовується цифрова низькочастотна фільтрація. Як типове рішення може використовуватися фільтр Баттерворта 4-го порядку з двопрорідною схемою (прямий та зворотний прохід), що дає близький до нульового фазовий зсув і відповідає підходам на кшталт SAE J211 [12] для обробки вимірювань у динамічних тестах.

Узгодження дискретизації (ресемплінг). Багато метрик ґрунтуються на порівнянні за відліками, тому обидва сигнали мають бути представлені з однаковою частотою дискретизації. Якщо частоти різні, дані з нижчою частотою перераховуються до вищої (наприклад, лінійною інтерполяцією).

Синхронізація в часі. Експериментальні та модельні дані можуть бути неузгоджені за часовою прив'язкою (містити часовий зсув), зумовлений, зокрема, запуском реєстрації, тригерними умовами або різними системами відліку часу. Для компенсації зсуву застосовуються методи пошуку такого часового зсуву, який мінімізує різницю між кривими – наприклад, мінімізація площі залишків

або суми квадратів залишків. За потреби користувач може повторити синхронізацію з іншим стартовим наближенням або іншим критерієм.

Після узгодження частоти та синхронізації система приводить криві до однакової тривалості: довший сигнал обрізається до розміру коротшого.

Метрики порівняння залежностей. Для кількісної оцінки узгодженості між експериментальними та модельними даними використовується набір детерміністичних показників і критеріїв, що забезпечують відтворюване порівняння часових залежностей (сигналів) за умов можливої різної дискретизації, часових зсувів та обмежених обчислювальних ресурсів. Після приведення сигналів до порівнюваного вигляду (зокрема ресемплінгу, нормування та синхронізації) узгодженість у часовій області доцільно оцінювати похибковими метриками, які відображають відмінність за величиною та інтегральну розбіжність, зокрема абсолютним відхиленням, відносним коефіцієнтом та середньоквадратичною помилкою (MSE), що може застосовуватись як базовий критерій проходження/непроходження заданого порога. Для підвищення стійкості оцінювання у випадку широкосмугових завдань та для фокусування на

фізично значущій складовій сигналу доцільно доповнювати аналіз переходом у частотну область, контролюючи наявність вираженої інформативної компоненти (спектрального піку на цільовій частоті або у вузькій смузі) та узгодженість фазових/часових характеристик відповідних компонент. У задачах параметричних досліджень коректність вибраної конфігурації доцільно оцінювати не лише за близькістю до експерименту, а і за критеріями чисельної здійсненності та стабільності, зокрема з урахуванням обмежень дискретизації й умов коректності типу CFL, а також за ресурсними показниками (час виконання та пікове споживання пам'яті) і, за потреби, за критерієм самоузгодженості результатів при контрольному прогоні з підвищеною точністю. Практичний досвід показує, що надмірна кількість метрик часто не підвищує інформативність через дублювання змісту, тому доцільно використовувати компактний набір показників, який покриває відмінність за величиною (абсолютна/відносна), інтегральну помилку (MSE) та часово-частотну узгодженість, доповнену критеріями коректності й ресурсної здійсненності для параметричного аналізу.

Функціональна модель (use-case)

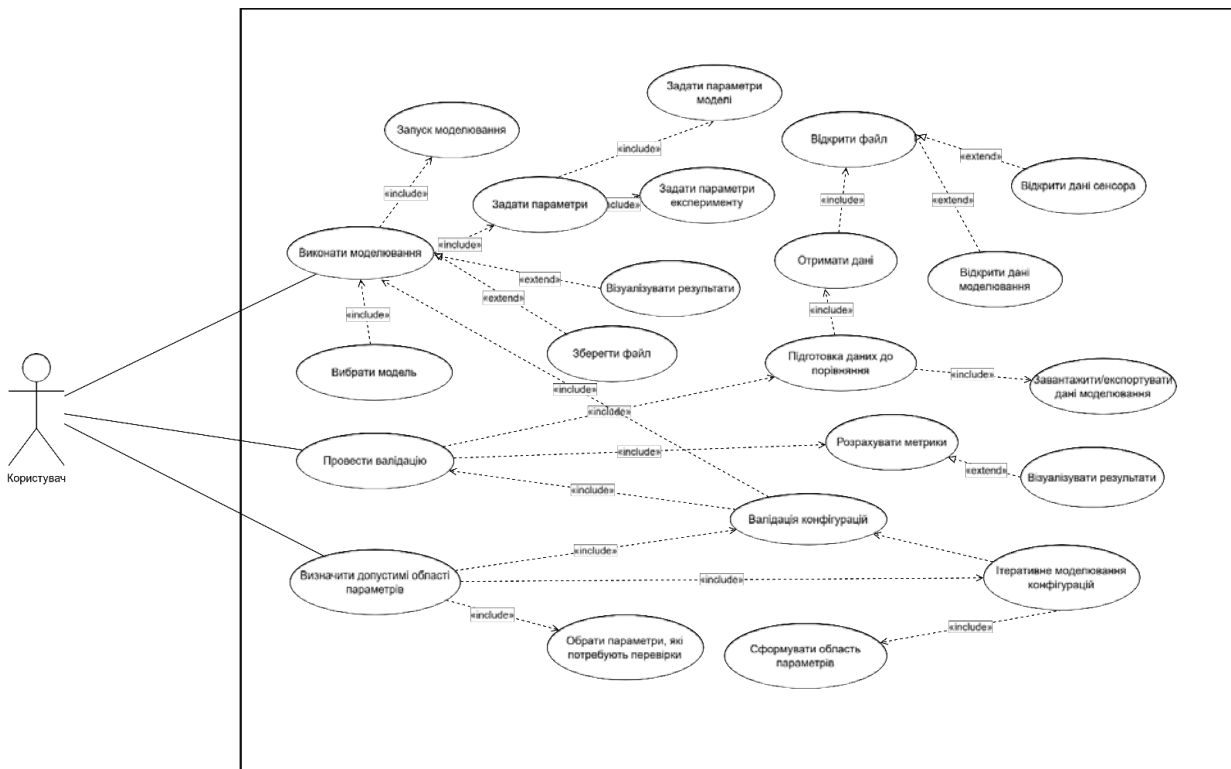


Рис. 1. Діаграма прецедентів програмного комплексу

Взаємодія з системою описується сценаріями, де користувач:

1. Завантажує/відкриває дані моделювання та експерименту/сенсора.
2. Задає параметри моделі та параметри експерименту (зокрема геометрію, координати, частотні та амплітудні характеристики, параметри середовища, профілі тощо).
3. Запускає моделювання, обирає модель/конфігурацію, виконує ітераційне уточнення налаштувань.
4. Проводить валідацію: готує дані до порівняння, обчислює метрики, переглядає результати.
5. Формує/уточнює допустимі області параметрів і визначає параметри, що потребують перевірки.
6. Візуалізує та зберігає підсумки у файли (таблиці/графіки).

Модульна архітектура. Архітектура організована як набір підсистем, що покривають весь цикл «дані → моделювання → V&V → звіт» [11].

Підсистема зв'язку із сенсором відповідає за приведення «сирих» вимірювань до придатного для подальшої роботи вигляду. У її складі реалі-

зовано читання бітової структури пакетів даних, відокремлення телеметрійної складової від акустичної, а також калібрування AHRS. Завдяки цьому на виході формується узгоджений і структурований набір сенсорних даних, який можна коректно обробляти та порівнювати з результатами моделювання.

Модуль FFT забезпечує виконання спектральних перетворень. Його призначення – переведення сигналів у частотну область для аналізу спектральних характеристик, а також для тих метрик і процедур порівняння, які чутливі до частотного складу, домінуючих гармонік та енергетичного розподілу.

Підсистема моделювання включає модуль завантаження моделей і призначена для підключення, вибору та підготовки конкретної чисельної моделі до запуску. Вона забезпечує коректну ініціалізацію модельних компонентів і формує основу для подальшого виконання розрахунків відповідно до заданої конфігурації.

Підсистема управління експериментами виконує роль керівного контуру, який збирає параметри, запускає моделювання та дає змогу вико-

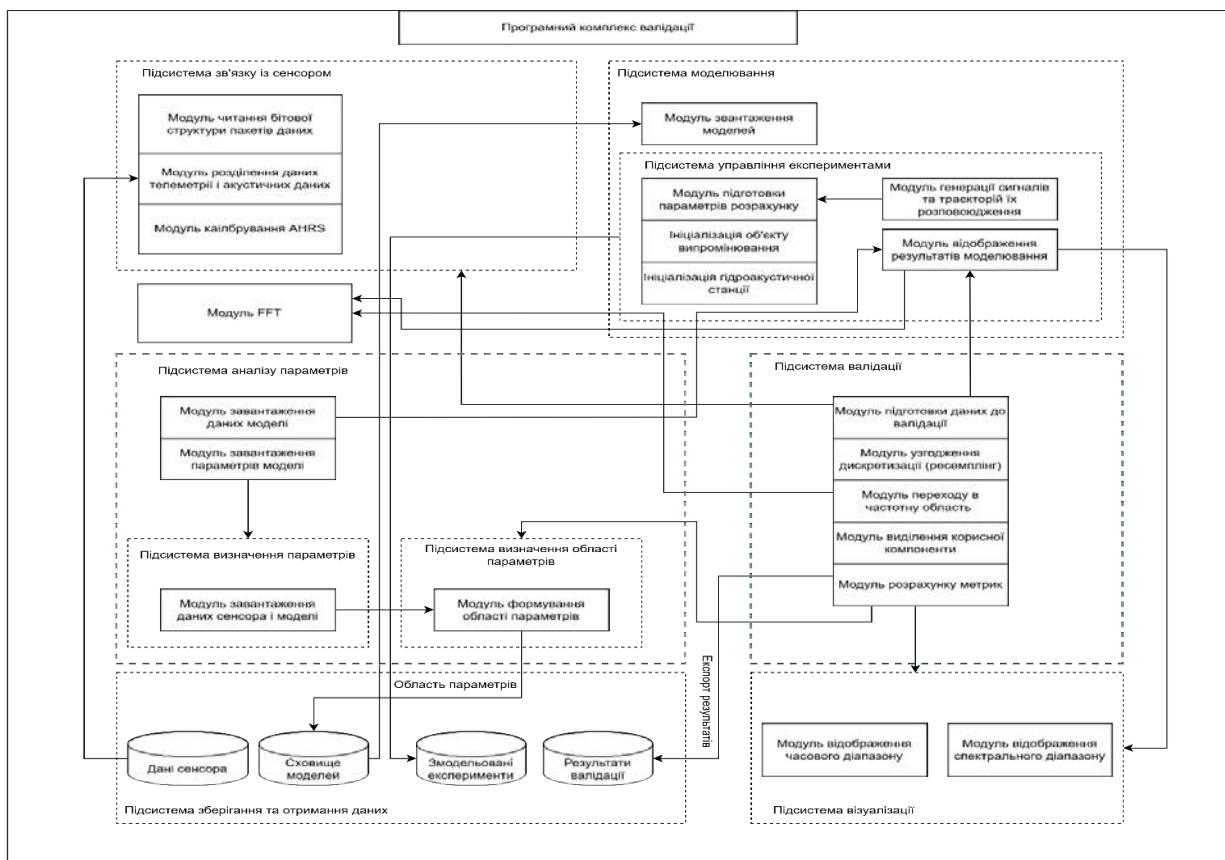


Рис. 2. Архітектура програмного забезпечення для валідації математичних моделей

нати первинний перегляд отриманих результатів. У межах цієї підсистеми здійснюється підготовка параметрів розрахунку, ініціалізація об'єкта випромінювання та гідроакустичної станції, генерація сигналів і траєкторії розповсюдження, а також відображення результатів моделювання для швидкої оцінки коректності виконання експерименту.

Підсистема аналізу параметрів і формування області параметрів орієнтована на підтримку параметричних досліджень та ітераційного V&V. У загальному випадку модель можна розглядати як чорний ящик $y = F(p)$, де p - вектор параметрів; необхідно сформулювати область Ω у параметричному просторі, в якій одночасно виконуються: (1) вимоги точності за обраними метриками порівняння, (2) чисельна коректність та стабільність розрахунку, (3) ресурсна здійсненність (час/пам'ять). Пошук такої області доцільно реалізовувати як поетапний відбір конфігурацій з відсівом за кожним з критеріїв. Вона охоплює завантаження даних і параметрів моделі, спільне використання даних сенсора та моделі, а також формування області параметрів. Завдяки цьому стає можливим визначати допустимі діапазони, системно відбирати параметри, які потребують перевірки, і організувати серії запусків із контрольованими змінами налаштувань.

Підсистема валідації є центральною частиною комплексу, оскільки саме тут реалізовано основну логіку порівняння сигналів і формування числових показників адекватності моделі. У ній виконується підготовка даних до порівняння, узгодження дискретизації шляхом ресемплінгу, перехід у частотну область, виділення корисної компоненти та розрахунок метрик. Результатом роботи підсистеми є набір кількісних оцінок, що відображають ступінь відповідності моделі експерименту.

Підсистема візуалізації забезпечує інтерпретацію отриманих результатів у наочній формі. Вона реалізує відображення сигналів у часовому діапазоні та у спектральному представленні, що дозволяє інженеру швидко побачити ключові відмінності й перевірити, чи узгоджується метрична оцінка з візуальною картиною порівняння.

Підсистема зберігання та отримання даних організовує роботу зі сховищами, у яких накопичуються дані сенсора, моделі, змодельовані експерименти та результати валідації. Така структура підтримує повторні запуски, дає змогу порівню-

вати серії експериментів і суттєво спрощує підготовку звітних матеріалів.

Експорт і документування результатів забезпечують збереження підсумків роботи платформи у формах, зручних для інженерної практики. Числові значення метрик можуть зберігатися як табличні дані, а графічні порівняння - як зображення.

Висновки. У роботі розглянуто підхід до побудови програмної платформи верифікації та валідації математичних і чисельних моделей на основі автоматизованого порівняння експериментальних та модельних часових залежностей. Запропонований процес орієнтований на підвищення відтворюваності оцінювання та зменшення суб'єктивності, що притаманна суто візуальному аналізу, і реалізує послідовність етапів імпорту даних, їх підготовки, кількісного оцінювання та формування звітних матеріалів.

Сформульовано вимоги до приведення експериментальних і модельних даних до порівнюваного вигляду з урахуванням можливої різної частоти дискретизації, часових зсувів і шумів вимірювань. Це забезпечує коректне обчислення метрик узгодженості та можливість повторюваного застосування процедури V&V для серійних експериментів. Для кількісної оцінки узгодженості застосовано детерміністичні метрики, зокрема абсолютне відхилення, відносний коефіцієнт та середньоквадратичну помилку, а також використано аналіз у частотній області для контролю інформативної складової сигналу та узгодженості фазових/часових характеристик.

Постановку параметричних досліджень сформульовано як задачу визначення області параметрів Ω , що забезпечує виконання заданих критеріїв узгодженості за метриками V&V, з урахуванням чисельної коректності та обмежених ресурсів. Запропоновано враховувати додаткові умови здійсненності, зокрема обмеження дискретизації та критерії стабільності типу CFL, а також ресурсні показники (час виконання та пікове споживання пам'яті), що є критичним для практичного застосування платформи в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованої архітектури та контуру обробки даних для прискорення і стандартизації циклів V&V, а також для підвищення обґрунтованості рішень, що приймаються на основі результатів моделювання.

Список літератури:

1. Bruce A. McCarl. Model Validation: An Overview with some Emphasis on Risk Models. The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library, 1984. 1–5.
2. D. Sornette, A. B. Davis, K. Ide, K. R. Vixie, V. Pisarenko, and J. R. Kamm. Algorithm for model validation: Theory and applications, 2007. 1–2. <https://doi.org/10.1073/pnas.0611677104>

3. D.J. Murray-Smith. Testing and Validation of Computer Simulation Models, Simulation Foundations, Methods and Applications. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 1–20.
4. Gonçalves S. N., Albuquerque D. M., Pereira J. C. Modelling and energy efficiency analysis of the microwave continuous processing of limestone. Journal of Cleaner Production, 142912, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142912>
5. Mongiardini M. Development of a Computer Program for the Verification and Validation of Numerical Simulations in Roadside Safety. Worcester Polytechnic Institute, 2010. <https://digitalcommons.wpi.edu/etd-dissertations/276/>
6. Mongiardini M., Ray M. H., Anghileri M. Acceptance criteria for validation metrics in roadside safety based on repeated full-scale crash tests. International Journal of Reliability and Safety, 4(1), 2010. 69. <https://doi.org/10.1504/ijrs.2010.029565>
7. Mongiardini M., Ray M. H., Anghileri M. Development of a software for the comparison of curves during the verification and validation of numerical models. 7th European LS-DYNA Conference, 2009. 1–12. <https://www.dynalook.com/european-conf-2009/K-I-03.pdf>
8. Pal N., Yadav D. K. Modeling and verification of software evolution using bigraphical reactive system. Cluster Computing, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04597-y>
9. Ray M. H., Mongiardini M., Atahan A. O., Anghileri M. Recommended procedures for verification and validation of computer simulations used for roadside safety. ResearchGate, 2008. https://www.researchgate.net/publication/313094419_Recommended_procedures_for_verification_and_validation_of_computer_simulations_used_for_roadside_safety_applications
10. Schwer L. E. An overview of the PTC 60/V&V 10: guide for verification and validation in computational solid mechanics. Engineering With Computers, 23(4), 2007. 245–252. <https://doi.org/10.1007/s00366-007-0072-z>
11. Tao F., Sun X., Cheng J., Zhu Y., Liu W., Wang Y., Xu H., Hu T., Liu X., Liu T., Sun Z., Xu J., Bao J., Xiang F., Jin X. makeTwin: A reference architecture for digital twin software platform. Chinese Journal of Aeronautics, 37(1), 2024. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.05.002>
12. SAE International. SAE J211/1_202208 Instrumentation for Impact Test Part 1 – Electronic Instrumentation. SAE International, 2022. doi:10.4271/J211/1_202208.
13. Гейко О., Варава І. Еталонна архітектура для програмної платформи верифікації математичних моделей. Information Technology and Society, №2(13), 2024. DOI: 10.32689/maup.it.2024.2.3.

Heiko O.O., Varava I.A., Pukha H. S., Dembitsky V.V., Vdovyna A.V. SOFTWARE ARCHITECTURE FOR VALIDATING MATHEMATICAL MODELS

This paper describes a software platform that supports verification and validation (V&V) of mathematical and numerical models by automating the comparison of experimental and simulated signals. The platform is intended for engineering applications where the credibility of conclusions depends on an objective and traceable comparison procedure, and where purely visual curve assessment is insufficient due to subjectivity, varying interpretation of waveform features, and sensitivity to scaling, offsets, or noise. To address these limitations, the platform provides a repeatable end-to-end workflow that integrates data acquisition/import, controlled pre-processing, quantitative metric evaluation, visualization, and reporting in a single toolchain.

In the proposed approach, experimental recordings and simulation outputs are imported from heterogeneous sources and aligned through a unified pre-processing stage. This stage explicitly accounts for differences in sampling rates, time shifts, segment length, and measurement noise, and may include filtering, resampling/interpolation, trimming to comparable windows, and time synchronization to ensure consistent signal matching for subsequent analysis. All processing steps and their settings are recorded to improve reproducibility and enable fair comparisons across multiple experiments, model revisions, and hardware configurations.

V&V is performed using a set of deterministic similarity metrics that quantify agreement in waveform shape and signal characteristics, complemented by visualization in both the time and frequency domains. The combination of numerical scores and graphical representations provides interpretable evidence of agreement (or mismatch), supports diagnostics of error sources (e.g., phase misalignment versus spectral discrepancy), and facilitates consistent decision making based on predefined acceptance criteria. The platform outputs results in reporting-friendly formats (e.g., tables and raster plots) to support documentation and further offline analysis.

Keywords: verification, validation, numerical simulation, curve comparison, similarity metrics, signal preprocessing, frequency analysis, software architecture.

Дата першого надходження статті до видання: 26.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026