

УДК 519.876.5

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

Олег ГЕЙКО

аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», oleg.63366@gmail.com
ORCID: 0009-0006-3279-8274

Іван ВАРАВА

доцент кафедри інженерії програмного забезпечення в енергетиці, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ivan.varava@ukr.net
ORCID: 0000-0001-9874-016X

ЕТАЛОННА АРХІТЕКТУРА ДЛЯ ПРОГРАМНОЇ ПЛАТФОРМИ ВЕРИФІКАЦІЇ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Анотація. Мета цієї роботи полягає в розробці програмного забезпечення для верифікації та валідації математичних моделей, що автоматично оцінює подібності та відмінності між двома кривими. Ця програма створюється, щоб допомогти інженерам та аналітикам виконувати порівняння кривих під час процесу верифікації та валідації чисельної моделі. Програмний комплекс дає змогу автоматичної попередньої обробки двох вхідних кривих, щоб зробити їх порівнянними.

Методологія, використана в роботі, включає декілька варіантів попередньої обробки вхідних кривих перед численням метрик порівняння. Дані можуть бути відфільтровані та синхронізовані, або будь-які зсуви чи дрейфи можуть бути видалені. Для забезпечення максимально точної перевірки доступні різні опції попередньої обробки, що надаються через зручний графічний інтерфейс користувача. Будь-яка операція, від введення кривих до вибору опції попередньої обробки та кінцевої візуалізації результатів, доступна через цей інтерфейс.

Наукова новизна роботи полягає в автоматизації процесу попередньої обробки та порівняння кривих, що значно спрощує та прискорює процес верифікації та валідації чисельних моделей. Розроблена програма дозволяє зменшити людські помилки та забезпечити більш точні результати, що є важливим для підвищення якості та надійності моделей. Крім того, можливість збереження чисельних результатів у зручному форматі електронної таблиці та графіків у вигляді растрових зображень робить програму ще більш корисною для подальших досліджень.

Висновки, зроблені на основі проведених досліджень, підкреслюють важливість верифікації та валідації як критичних етапів у розробці комп'ютерних моделей для забезпечення їх точності та надійності. У роботі зазначено, що досягнення найкращих результатів вимагає постійного вдосконалення та дотримання найкращих практик у процесі розробки та застосування моделей. Простими прикладами з використанням аналітичної форми ілюструються характеристики метрик, що демонструють ефективність та точність розробленого програмного забезпечення.

Таким чином, представлена робота робить значний внесок у сферу верифікації та валідації чисельних моделей, пропонуючи інноваційні підходи до автоматизації порівняння кривих та покращуючи точність та ефективність цього процесу. Ця програма стане незамінним інструментом для інженерів та аналітиків, сприяючи підвищенню якості математичних моделей та їх відповідності реальним даним.

Ключові слова: верифікація, валідація, модель, дані, аналіз.

Oleh HEIKO, Ivan VARAVA. REFERENCE ARCHITECTURE FOR THE SOFTWARE PLATFORM FOR VERIFICATION OF MATHEMATICAL MODELS

Abstract. The purpose of this work is to develop software for verification and validation of mathematical models that automatically evaluates similarities and differences between two curves. This program is created to help engineers and analysts perform curve comparisons during the numerical model verification and validation process. The software package enables automatic pre-processing of two input curves to make them comparable.

The methodology used in the work includes several options for preprocessing the input curves before calculating the comparison metrics. The data can be filtered and synchronized, or any shifts or drifts can be removed. Various pre-processing options are available through a user-friendly graphical user interface to ensure the most accurate verification possible. Any operation, from entering curves to selecting pre-processing options and final visualization of the results, is available through this interface.

The scientific novelty of the work consists in the automation of the process of pre-processing and comparison of curves, which significantly simplifies and speeds up the process of verification and validation of numerical models. The developed program reduces human errors and provides more accurate results, which is important for improving the quality and reliability of models. In addition, the ability to save numerical results in a convenient format of a spreadsheet and graphs in the form of raster images makes the program even more useful for further research.

The conclusions drawn on the basis of the conducted studies emphasize the importance of verification and validation as critical stages in the development of computer models to ensure their accuracy and reliability. The work states that achieving the best results requires constant improvement and adherence to best practices in the process of developing and applying models. Simple examples using an analytical form illustrate the characteristics of metrics that demonstrate the effectiveness and accuracy of the developed software.

Thus, the presented work makes a significant contribution to the field of verification and validation of numerical models, offering innovative approaches to the automation of curve comparison and improving the accuracy and efficiency of this process. This program will become an indispensable tool for engineers and analysts, helping to improve the quality of mathematical models and their correspondence to real data.

Key words: verification, validation, model, data, analysis.

Вступ. Порівняння відповідності між кривими з фізичних експериментів і математичних моделей є дуже важливою та загальноприйнятою технікою, яку використовують науковці та інженери для визначення, чи адекватно математичні моделі представляють фізичні явища. Під час верифікації або валідації обчислювальних моделей порівнюють експериментальну і чисельну криві, щоб оцінити, наскільки добре чисельна модель прогнозує фізичне явище [7]. Традиційно криві порівнювали візуально, зіставляючи піки, коливання, загальні форми тощо. Хоча такий вид порівняння дає уявлення про те, наскільки подібні дві криві, він базується виключно на суб'єктивному судженні, яке може відрізнятись від одного аналітика до іншого. Рішення про валідацію та верифікацію повинні базуватись якомога більше на кількісних критеріях, які є однозначними і математично точними. Щоб мінімізувати суб'єктивність, необхідно визначити об'єктивні критерії порівняння, які базуються на обчислювальних заходах. Метрики порівняння, які є математичними мірами, що кількісно визначають рівень відповідності між результатами моделювання та експериментальними результатами, можуть досягти цієї мети [5].

В інженерії було розроблено кілька метрик порівняння. Метрики можна поділити на дві основні категорії: детерміністичні метрики та стохастичні метрики. Детерміністичні метрики не враховують ймовірнісну варіацію як експериментів, так і розрахунків (тобто результати розрахунків передбачається однаковими при однакових вхідних даних), тоді як стохастичні метрики включають обчислення ймовірної варіації як у симуляції, так і у відповідях експериментів через варіації параметрів [5]. Детерміністичні метрики, знайдені в літературі, можна додатково класифікувати на два основні типи: метрики, специфічні для домену, і метрики порівняння форм. Метрики, специфічні для домену, є величинами, специфічними для певної області застосування. З іншого боку, метрики порівняння форм включають порівняння двох кривих; одна крива з чисельного моделювання і інша з фізичного експерименту. Криві можуть бути часовими рядами, графіками тощо. Метрики порівняння форм оцінюють ступінь схожості між будь-якими двома кривими загалом і, таким чином, не залежать від конкретної області застосування.

У цій статті описується програмне забезпечення, яке автоматично оцінює найпоширеніші метрики порівняння форм, знайдені в літературі. Програма, була спеціально розроблена для оцінки метрик, що використовуються у верифікації та/або валідації чисельних моделей. Щоб правильно оцінити метрики порівняння форм, програма виконує серію завдань попередньої обробки перед фактичним обчисленням метрик.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Щоб забезпечити надійні результати, необхідно, щоб чисельна модель була точно верифікована та валідована (verified and validated (V&V)). Нижче наведено суворе визначення обох концепцій верифікації та валідації чисельних моделювань, як їх нещодавно сформулювало Американське товариство інженерів-механіків (ASME) (ASME, 2006) [5].

Верифікація визначається як процес визначення того, що обчислювальна модель точно представляє підлягаючу математичну модель і її рішення.

Валідація визначається як процес визначення ступеня, до якого модель є точною репрезентацією реального світу з точки зору передбачуваних використань моделі [6].

На практиці верифікація є процесом перевірки того, що чисельна модель була правильно реалізована, тоді як валідація гарантує, що результати, отримані з моделі, узгоджуються з реальним світом. Зокрема, питання, яке лежить в основі валідації, чи симуляція відтворює фізичний експеримент і, відповідно, чи може вона бути використана для дослідження та прогнозування реакції нових або модифікованих експериментів в реальному світі [6,7].

Зокрема, оцінка рівня V&V чисельної моделі повинна проводитися за допомогою кількісних методів порівняння. Використання вимірюваних показників для кількісної оцінки рівня V&V дозволяє об'єктивно оцінити модель з усіма наслідками, що впливають з цього. Не тільки проектувальники, але й особи, що приймають рішення та регулятори, отримують користь від використання суворих і об'єктивних процедур V&V. Зокрема, коли потрібно прийняти рішення, засноване виключно на результатах моделювань, процес оцінки на основі кількісних критеріїв, які є однозначними та математично точними, надасть особам, що приймають рішення та регуляторам, вимірюваний рівень надійності чисельної моделі [5].

Процес верифікації моделі є початковим кроком. Її можна вважати еквівалентом остаточної перевірки моделі, щоб переконатися, що все було реалізовано в моделі відповідно до плану [9].

Оскільки аналітичний підхід має свої обмеження та труднощі, верифікація чисельних моделей, у строгому сенсі цього слова не завжди можлива. Однак можна перевірити, чи чисельна модель створює стабільні рішення. Хоча очікується, що в аналізі можуть бути присутніми недоліки, результуюча помилка повинна бути обмежена до розумного рівня, щоб мати мінімальний вплив на рішення [8].

Наступним кроком є перевірка того, що основні закони збереження дотримуються протягом усього моделювання. Це можна досягти шляхом перевірки того, що глобальні величини (наприклад, такі як енергія та маса) залишаються постійними протягом усього моделювання [10].

Хоча необхідний, процес верифікації, описаний вище, не є достатнім для повного запевнення регулятора в тому, що модель точно відтворює фізичну подію, що цікавить. Необхідний додатковий рівень впевненості, який надається процесом валідації. Загалом, процес валідації включає порівняння експериментальних і чисельних результатів для оцінки того, наскільки добре симуляція відтворює реальну подію, що цікавить. Фізичні величини, розглянуті в таких порівняннях, можуть бути різного характеру. Зокрема, ці величини інтересу часто вимірюються як функція часу (наприклад, часовий ряд прискорення центру мас транспортного засобу, тощо), а не як одиничне значення [1].

Хоча просте візуальне порівняння дає загальну оцінку того, наскільки добре збігаються експериментальні та чисельні криві, воно неминуче буде обмежене суб'єктивною інтерпретацією оцінювача. Таким чином, потрібен кількісний і вимірюваний тип порівняння для об'єктивної оцінки. Зауважте, що, оскільки величини інтересу здебільшого є часовими рядами, не завжди можливо здійснити пряме порівняння між величинами інтересу, вимірними під час експериментального тесту, та тими, що обчислені в відповідній чисельній симуляції. Це питання можна вирішити за допомогою метрик порівняння, які є засобами, що кількісно оцінюють рівень відповідності між будь-якими двома кривими (тобто симуляція проти експериментальних значень).

Різноманітні метрики валідації можна знайти в літературі, але їх можна згрупувати в дві основні категорії: детерміністичні метрики та стохастичні метрики. Детерміністичні метрики не враховують імовірнісної варіації результатів, тобто криві вважаються повторюваними, оскільки вхідні параметри визначені детерміновано, і вважається, що як тест, так і симуляція можуть бути ідеально повторюваними. З іншого боку, стохастичні метрики враховують імовірну варіацію як експериментальних, так і симуляційних кривих через невизначеність вхідних параметрів. Хоча стохастичні метрики є більш репрезентативними для варіації системної відповіді завдяки їх здатності враховувати невизначеність деяких параметрів (наприклад, варіація матеріалів, тощо), вони вимагали б значно більших зусиль.

На жаль, для валідації моделі, яка враховує стохастичну варіацію відповідних параметрів інтересу, потрібно було б багаторазово повторювати експериментальні тести при очікуваній варіації вхідних параметрів для збору інформації про стохастичний розподіл результатів. Враховуючи можливі великі витрати на повномасштабний тест цей підхід був би надзвичайно дорогим. З цієї причини для верифікації та валідації моделей доцільним є використання лише детерміністичних метрик.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є розробка вимог до програмного забезпечення, яке б могло забезпечити автоматизований процес верифікації та валідації (V&V) чисельних моделей, що використовуються в різних галузях інженерії та науки [3]. Це програмне забезпечення повинно: забезпечувати точну і об'єктивну оцінку чисельних моделей, автоматизувати процес порівняння результатів чисельного моделювання з експериментальними або еталонними даними для зменшення суб'єктивності та людських помилок, включати алгоритми для обчислення детерміністичних та стохастичних метрик валідації, зокрема метрик, що підходять для різних типів чисельних моделей, надавати користувачам можливість ефективно документувати та аналізувати результати верифікації та валідації, забезпечувати підтримку різних форматів даних, забезпечувати надійність та точність результатів для підвищення довіри до чисельних моделей у процесі прийняття рішень у різних галузях, таких як аерокосмічна техніка, машинобудування, будівництво, біомедицина тощо.

Таким чином, розроблене програмне забезпечення буде сприяти покращенню процесів проектування та оцінки інженерних і наукових систем, забезпечуючи надійні та об'єктивні результати верифікації та валідації чисельних моделей.

Основна частина

1. Попередня обробка.

Оскільки дві порівнювані криві можуть походити з різних джерел, важливо попередньо обробити їх однаково, щоб уникнути можливих проблем, спричинених різними окремими процедурами попередньої обробки. Деякі операції попередньої обробки, такі як повторне вибіркування і обрізка двох кривих, є необхідними, оскільки криві повинні мати однакову довжину і бути порівнюваними точка до точки. Інші кроки попередньої обробки, такі як фільтрація та коригування зсуву датчика, хоча і не є суворо необхідними, можуть відігравати важливу роль у кінцевому результаті порівняння. Наприклад, дві ідентичні криві, які просто зміщені в часі одна відносно одної через те, що дані були записані з різним часом початку, можуть дати поганий результат лише через початкове значення зміщення між ними.

ПЗ повинно виконувати такі операції попередньої обробки: (1) фільтрація, (2) повторне вибіркування, (3) синхронізація і (4) обрізка. У наступних розділах представлено короткий опис завдань попередньої обробки.

1.1. Фільтрація

Фільтрація кривих зазвичай є необхідною. Наприклад, у випадку краш-тестів, зібрані прискорення характеризуються високочастотними шумами, які потрібно видалити перед обчисленням метрик порівняння за допомогою фільтрації кривих. Користувач може вибрати між найпоширенішими значеннями для класу частоти каналу (CFC) або навіть визначити спеціальні характеристики фільтра, якщо це необхідно. Функція фільтрації є цифровим низькочастотним фільтром Баттерворта 4-го порядку. Алгоритм використовує опцію двохпрохідної фільтрації: дані фільтруються двічі, спочатку вперед, а потім назад, використовуючи різницеве рівняння в часовій області, запропоноване в специфікаціях SAE J211.

1.2. Повторне вибіркування

Оскільки більшість метрик порівняння форм базуються на точкових порівняннях (тобто дані в кожній вибірковій точці порівнюються з відповідною точкою на іншій кривій), обидві криві повинні мати однакову частоту вибірки. Після фільтрації даних ПЗ повинно перевірити два набори даних, щоб визначити, чи були вони згруповані з однаковою частотою (з допустимою похибкою 5E-6). Якщо криві не мають однакової частоти вибірки, програма повинна проводити повторне вибіркування кривої з меншою частотою вибірки (тобто з більшим інтервалом часу між двома суміжними точками даних) на більш високу частоту іншої кривої. Повторне вибіркування виконується за допомогою простої лінійної інтерполяції.

1.3. Синхронізація

Зазвичай часові ряди, які потрібно порівняти, не починаються одночасно і, отже, дві криві зміщені на фіксовану величину вздовж осі абсцис. Оскільки метрики порівняння зазвичай є точковими порівняннями, зсув у часі між двома кривими потрібно виявити і скоригувати, щоб забезпечити відповідність точок під час оцінювання метрик.

Доступні два різні методи синхронізації: (1) мінімальна площа між кривими або (2) метод найменших квадратів. Функція "shift" зміщує одну з двох кривих на величину S , де позитивне значення s означає зсув вперед для тестової кривої, тоді як негативне значення еквівалентне зсуву назад для кривої моделювання. Програма визначає значення зсуву, яке мінімізує або абсолютну площу залишків (метод 1), або суму квадратів залишків (метод 2). Значення зсуву, яке відповідає мінімальній похибці, є найбільш імовірною точкою відповідності між кривими. У разі, якщо результат незадовільний, користувач може повторити процедуру синхронізації, використовуючи інше початкове значення зсуву для алгоритму мінімізації або використовуючи інший метод мінімізації

1.4. Обрізка

Після того, як дві криві були повторно вибіркувані, відфільтровані та синхронізовані, програма перевіряє, чи мають вони однакову довжину і, у разі потреби, обрізає довшу криву до розміру коротшої. Після завершення цих кроків попередньої обробки метрики порівняння форм можуть бути обчислені.

2. Метрики

У цьому розділі наведено короткий опис метрик порівняння форм. Всі шістнадцять метрик, розглянутих у цій статті, є детерміністичними метриками порівняння форм. Деталі математичного формулювання кожної метрики можна знайти в цитованій літературі. Концептуально метрики можна класифікувати на три основні категорії: (i) метрики, що враховують величину та фазу (MPC), (ii) метрики з однією величиною та (iii) метрики аналізу варіацій (ANOVA) [4].

2.1. Метрики MPC

Метрики MPC обробляють величину та фазу кривої окремо, використовуючи дві різні метрики (тобто M та P , відповідно). Метрики M та P потім поєднуються в єдину метрику, що враховує всеохоплююче значення, C . До метрик MPC, належать: (1) Geers, (2) Russell та (3) Knowles and Gear. Математичне визначення кожної метрики наведено в таблиці 1. У цьому та наступних розділах терміни m_i та c_i відносяться до вимірних та обчислених величин відповідно, з індексом « i », що вказує на конкретний момент часу. Це позначення припускає, що виміряні точки даних (тобто m_i) є «справжніми» даними, а обчислені точки даних (тобто c_i) є точками даних, які тестуються при порівнянні [2].

У всіх метриках MPC компонент фази (P) повинен бути нечутливим до відмінностей у величині, але чутливим до відмінностей у фазі чи часі між двома часовими рядами. Так само компонент величини (M) повинен бути чутливим до відмінностей у величині, але відносно нечутливим до відмінностей у фазі. Ці характеристики метрик MPC дозволяють аналітику визначити аспекти кривих, які не відповідають один одному. Для кожного компонента нуль вказує на те, що дві криві ідентичні. Різні варіації метрик MPC відрізняються головним чином способом обчислення метрики фази, як вона масштабується відносно метрик величини та як вона обробляє синхронізацію фази. Зокрема, метрика Sprague and Geers використовує той самий компонент фази, що і метрика Russell. Крім того, компонент величини метрики Russell є особливим, оскільки він базується на логарифмі за основою 10 і є єдиною симетричною метрикою серед метрик MPC, розглянутих у цій статті (тобто порядок двох кривих не має значення).

Метрика Knowles and Gear є найновішою варіацією метрик типу MPC. На відміну від раніше розглянутих метрик MPC, вона базується на порівнянні точка до точки. Фактично, ця метрика вимагає, щоб дві порівнювані криві спочатку були синхронізовані в часі на основі так званого часу прибуття (TOA), що представляє час, коли крива досягає певного відсотка від пікового значення. У цій роботі відсоток пікового значення, який використовується для оцінки TOA, становить 5 відсотків, що є типовим значенням у літературі. Після того, як криві синхронізовані за допомогою TOA, можливо оцінити метрику величини. Крім того, щоб уникнути створення розриву між часовими рядами, що характеризуються великою величиною, та тими, що характеризуються меншою величиною, компонент величини M має бути нормалізований за допомогою нормалізаційного фактора QS . На рисунку 1 зображено вікна з програмного забезпечення де використовується MPC метрики [4].

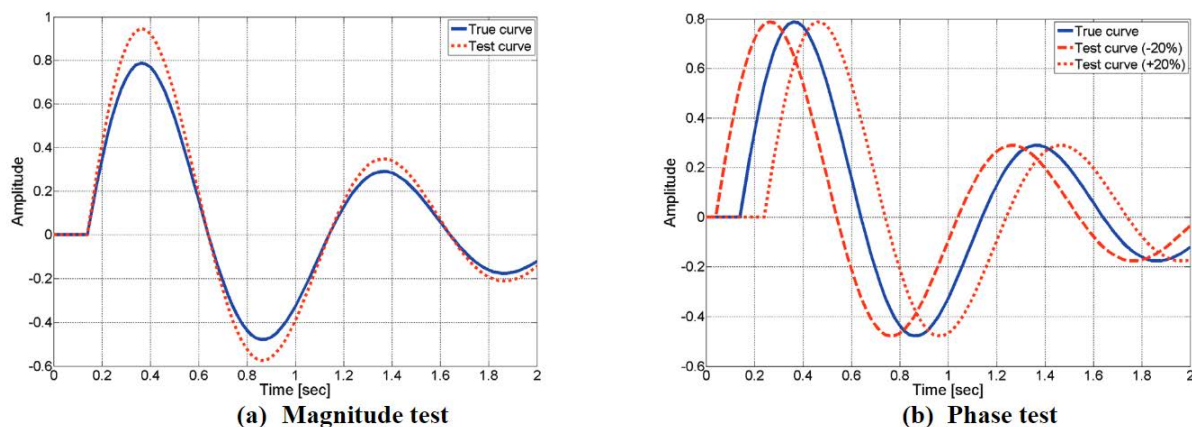


Рис. 1. Форми аналітичної ваги, створені для (а) перевірки величини або (б) перевірки фази

2.2. Метрики з однією величиною

Метрики з однією величиною дають одне числове значення, яке представляє відповідність між двома кривими: (1) метрика коефіцієнта кореляції, (2) метрика коефіцієнта кореляції NARD (NARD), (3) метрика помилки Zilliacus, (4) метрика помилки RSS, (5) метрика нерівності Theil, (6) метрика нерівності Whang та (7) метрика коефіцієнта регресії. Перші дві метрики базуються на інтегральних порівняннях, тоді як інші є точковими порівняннями. Визначення кожної метрики наведено в таблиці 2.

2.3. Метрики ANOVA

Метрики ANOVA базуються на припущенні, що якщо дві криві представляють ту саму подію, тоді будь-які відмінності між кривими повинні бути викликані лише випадковим експериментальним шумом. Аналіз варіацій (тобто ANOVA) є стандартним статистичним тестом, який можна використовувати для оцінки того, чи можна приписати залишки між двома кривими лише випадковій похибці. Коли два часові ряди представляють ту саму фізичну подію, вони повинні бути ідентичними, щоб середнє значення і стандартне відхилення залишкових помилок були обидва нульовими. Звичайно, це ніколи не буває у практичних ситуаціях (наприклад, експериментальні похибки спричиняють невеликі варіації між результатами тестів, навіть у ідентичних тестах). Т-статистика надає ефективний метод для перевірки припущення, що спостережувані залишкові помилки є близькими до нуля, щоб представляти лише випадкові помилки. Оберкамф і Рей незалежно запропонували схожі методи. У версії ANOVA, запропонованій Реєм, залишкова помилка та її стандартне відхилення нормалізуються відносно пікового значення справжньої кривої.

Таблиця 1

Математичне формулювання метрик МРС

| | Magnitude | Phase | Comprehensive |
|-----------------------------------|--|--|---|
| Integral comparison metrics | | | |
| Geers | $M_G = \sqrt{\frac{\sum c_i^2}{\sum m_i^2}} - 1$ | $P_G = 1 - \frac{\sum c_i m_i}{\sqrt{\sum c_i^2 \sum m_i^2}}$ | $\sqrt{M_G^2 - P_G^2}$ |
| Geers CSA | $M_G = \sqrt{\frac{\sum c_i^2}{\sum m_i^2}} - 1$ | $P_{CSA} = 1 - \frac{ \sum c_i m_i }{\sqrt{\sum c_i^2 \sum m_i^2}}$ | $sign(\sum c_i m_i) \sqrt{M_{CSA}^2 - P_{CSA}^2}$ |
| Sprague&Geers | $M_G = \sqrt{\frac{\sum c_i^2}{\sum m_i^2}} - 1$ | $P_{SG} = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \frac{\sum c_i m_i}{\sqrt{\sum c_i^2 \sum m_i^2}}$ | $\sqrt{M_{SG}^2 - P_{SG}^2}$ |
| Russell | $M_R = sign(m) \log_{10}(1 + m)$ where $\frac{(\sum c_i^2 - \sum m_i^2)}{\sqrt{\sum c_i^2 \sum m_i^2}}$ | $P_R = \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \frac{\sum c_i m_i}{\sqrt{\sum c_i^2 \sum m_i^2}}$ | $\sqrt{\frac{\pi}{4} (M_R^2 + P_R^2)}$ |
| Point-to-point comparison metrics | | | |
| Knowles&Gear | $M_{KG} = \sqrt{\frac{\sum \left(\frac{ m_i }{m_{max}}\right)^p (\tilde{c}_i - m_i)^2}{\sum \left(\frac{ m_i }{m_{max}}\right)^p (m_i)^2}}$ where $\tilde{c} = c(\tau - t)$ (with $\tau = TOA_c - TOA_m$) | $P_{KG} = \frac{ TOA_c - TOA_m }{TOA_m}$ | $\sqrt{\frac{10M_{KG}^2 - 2P_{KG}^2}{12}}$ |

Таблиця 2

Математичне формулювання метрик з однією величиною

| Integral comparison metrics | | | |
|-----------------------------------|--|---|--|
| Correlation Coefficient | $\frac{n \sum c_i m_i - \sum c_i \sum m_i}{\sqrt{n \sum c_i^2 - (\sum c_i)^2} \sqrt{n \sum m_i^2 - (\sum m_i)^2}}$ | Correlation Coefficient (NARD) | $\frac{\sum c_i m_i}{\sqrt{\sum c_i^2} \sqrt{\sum m_i^2}}$ |
| Weighted Integrated Factor | | $\sqrt{\frac{\sum \max(m_i^2, c_i^2) \cdot \left(\frac{(1 - \max(0, m_i \cdot c_i))}{\max(m_i^2, c_i^2)}\right)^2}{\sum \max(m_i^2, c_i^2)}}$ | |
| Point-to-point comparison metrics | | | |
| Zilliacus error | $\frac{\sum c_i - m_i }{\sum m_i }$ | RMS error | $\frac{\sqrt{\sum (c_i - m_i)^2}}{\sum m_i^2}$ |
| Theil's inequality | $\frac{\sqrt{\sum (c_i - m_i)^2}}{\sqrt{\sum c_i^2} + \sqrt{\sum m_i^2}}$ | Whang's inequality | $\frac{\sum c_i - m_i }{\sum c_i + \sum m_i }$ |
| Regression coefficient | | $\sqrt{1 - \frac{(n-1) \sum (c_i - m_i)^2}{n \sum (m_i - \bar{m})^2}}$ | |

3. Структура ПЗ

На діаграмі послідовності (рисунок 2) програмного забезпечення верифікації та валідації представлено ключові етапи процесу порівняння кривих. Першим кроком є введення користувачем двох

кривих, які потрібно порівняти. Після цього програма автоматично проводить попередню обробку даних, включаючи фільтрацію, повторне вибіркування, синхронізацію та обрізку кривих, щоб забезпечити їхню сумісність. Програма обчислює значення і генерує числові результати та графіки, які потім зберігаються у зручному форматі для подальшого аналізу. Завершальний етап включає візуалізацію результатів у графічному інтерфейсі користувача, що дозволяє інженерам та аналітикам легко оцінити схожість між кривими та зробити відповідні висновки щодо верифікації та валідації чисельної моделі.

На наступній діаграмі (рисунок 3) використання програмного забезпечення верифікації та валідації показано основні функції та взаємодії між користувачем та системою. Випадок використання починається з введення користувачем двох кривих, які підлягають порівнянню. Основними елементами є імпорт моделей, верифікація, валідація, вибір методів та представлення результатів.

На рисунку 4 зображено шарову архітектуру програмного забезпечення верифікації та валідації показано основні рівні системи. Програмне забезпечення складається з шести основних шарів: графічний інтерфейс користувача, менеджмент даних, візуалізація даних та результатів, симуляція, верифікація та сховища даних [11].

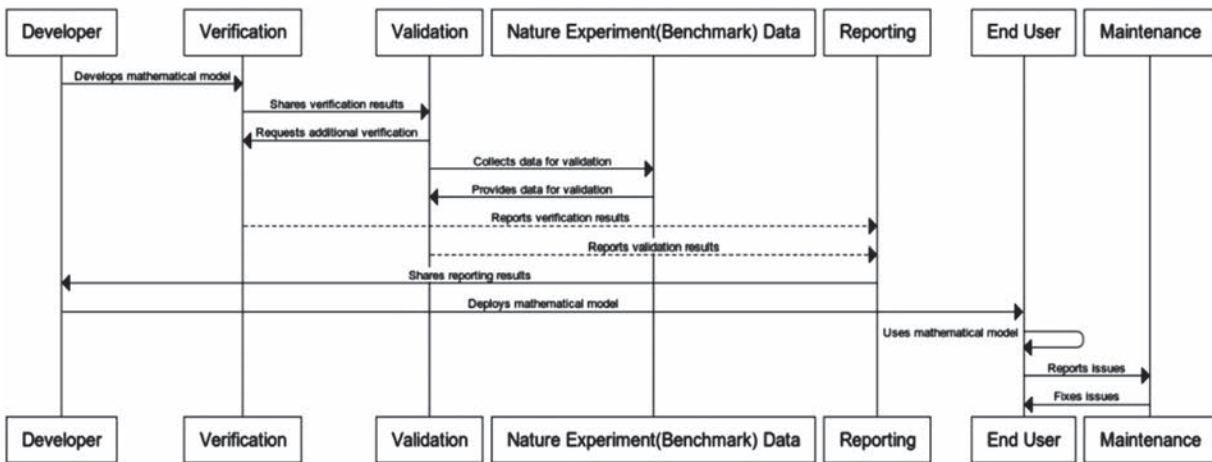


Рис. 2. Місце верифікації та валідації в життєвому циклі комп'ютерної моделі

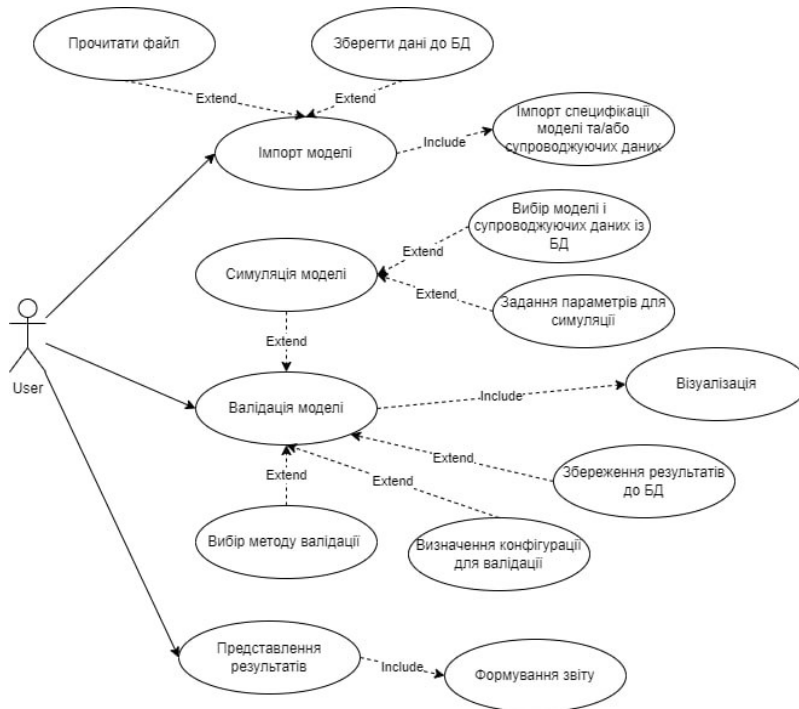


Рис. 3. Use-case діаграма

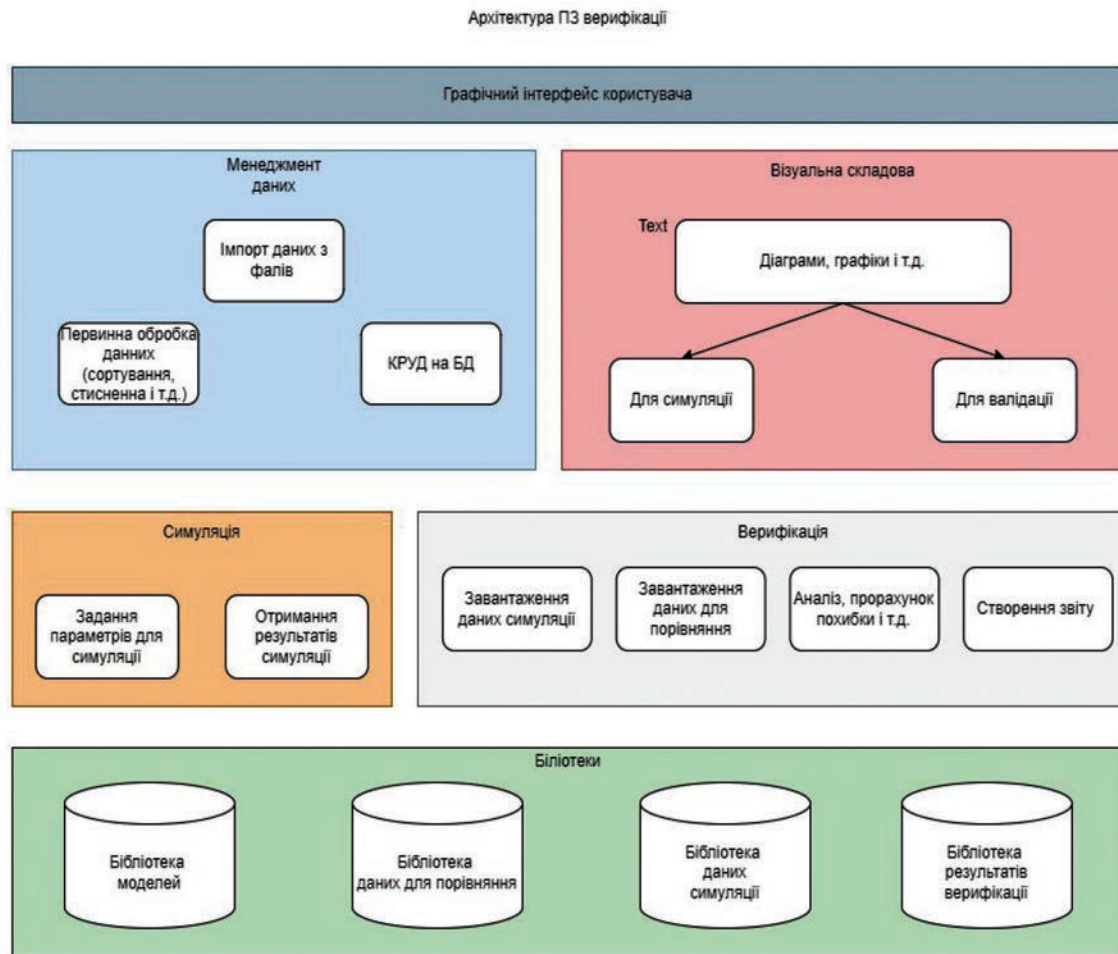


Рис. 4. Шарова архітектура

Висновки. У цій статті описано розробку програми для оцінки метрик порівняння простих аналітичних кривих та реального порівняння кривих тест/симуляція. Для двох вхідних кривих доступні декілька опцій попередньої обробки: дані можуть бути відфільтровані, скориговані для будь-якого зсуву, вибірковані з однаковою частотою і синхронізовані до одного еквівалентного початкового часу. Попередня обробка є важливим кроком для забезпечення коректного порівняння двох кривих.

Було розглянуто шістнадцять окремих метрик, які оцінюють порівняння між тестовою та справжньою кривими. Огляд результатів та формулювань цих метрик показує, що насправді існують лише три основні характеристики порівняння форми, які оцінюються: схожість за величиною, схожість за фазою та форма кривої залишкової помилки. Оскільки багато метрик мають схожі формулювання, їхні результати часто є ідентичними або дуже схожими, і немає сенсу включати всі варіації. Метрики Sprague-Geers MPC рекомендуються для оцінки схожості за величиною (тобто метрика M) та фази (тобто метрика P), а метрика ANOVA рекомендується для оцінки характеристик залишкових помилок. Зокрема, для метрик Sprague-Geers використання часових рядів швидкості виявилось більш надійною та глобальною оцінкою порівняння [8].

Передбачається, що ПЗ для V&V надасть зручну платформу для інженерів, щоб досліджувати схожості та відмінності між результатами фізичних тестів та обчислювальних результатів у процесах валідації, а також порівнювати відтворюваність фізичних експериментів. Програма надає всі інструменти, необхідні для швидкого виконання оцінок між двома кривими.

Також у цій статті було надано огляд процедур для верифікації та валідації (V&V) чисельних моделей, що використовуються для моделювання типових сценаріїв, які застосовуються для оцінки безпеки інженерних систем. Розвиток комп'ютерних технологій та розробка складних та ефективних кодів зараз дозволяють детально моделювати події. Зрештою, надійність результатів моделювання залежить від правильно верифікованої та валідованої моделі. Це особливо важливо в тих випадках, коли

офіційне прийняття змін до інженерних систем урядовими агентствами може ґрунтуватися виключно на аналізі моделювання [9].

Впровадження стандартизованого та суворого методу V&V чисельних моделей у різних галузях принесе користь як проєктувальникам, так і особам, що приймають рішення. Зокрема, об'єктивна та кількісна оцінка рівня валідації, гарантована використанням метрик порівняння, дозволить проєктувальникам краще визначати точність своїх прогнозів. Кількісний характер цього процесу V&V також надає особам, що приймають рішення, можливість приймати рішення на основі вимірюваного рівня точності чисельної моделі.

Список використаних джерел:

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.061167710>.
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/Chinese Journal of Aeronautics, 37(1), 2024. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.05.002>