

**Гейко О.О.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРАВИЛЬНОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ ЧЕРЕЗ ВЕРИФІКАЦІЮ ТА ВАЛІДАЦІЮ

*Стаття присвячена важливості процесів верифікації та валідації комп'ютерних моделей, які використовуються для моделювання та прогнозування поведінки складних систем у науці, техніці та бізнесі. Вона розкриває ключові аспекти цих процесів та їх значення для забезпечення точності та надійності моделей. Комп'ютерні моделі допомагають передбачати, аналізувати та оптимізувати поведінку різноманітних систем, від фізичних об'єктів до економічних процесів. Актуальність статті полягає в тому, що недостовірні або погано підтверджені моделі можуть призвести до неправильних рішень, втрати ресурсів та навіть небезпеки для життя та здоров'я. Довіра до комп'ютерних моделей залежить від їх вірогідності та точності. Велика частина цієї довіри походить від процесу верифікації та валідації моделей. Верифікація – це перевірка того, чи відповідає модель заданим специфікаціям та правильно реалізує певні аспекти системи. Після успішної верифікації модель має правильну структуру і повинна правильно функціонувати з технічної точки зору. Валідація, з іншого боку, відбувається в порівнянні моделі поведінки з реальними даними або іншими незалежними джерелами, переконайтеся в тому, що модель правильно створює реальні умови. Цей процес розширення застосування точність та надійність моделі. Процес верифікації та валідації може бути складним, і він може залежати від типу моделі та призначення її використання. Однією з проблем, пов'язаних з верифікацією та валідацією, є недостатність даних або невідповідність між даними та реальною системою. Це може вплинути на точність моделі та призвести до неточних прогнозів. Найкращі практики включають проведення підсумкового аналізу даних для верифікації моделі та вибір адекватних метрик для валідації. Крім того, розробники повинні документувати процес верифікації та валідації для забезпечення прозорості та повторюваності. У підсумку, верифікація та валідація є критичними етапами у розробці комп'ютерних моделей для забезпечення їх точності та надійності. Тако ж було зазначено, що досягнення найкращих результатів вимагає постійного вдосконалення та дотримання найкращих практик у процесі розробки та застосування моделей.*

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

**Постановка проблеми.** Математичне та комп'ютерне моделювання є досить поширеними інструментами і використовуються в багатьох галузях науки і техніки. Для опису будь-якої реальної системи можна вибрати велику кількість можливих моделей, які будуть корисні в різних випадках [1].

Найбільш поширене тлумачення терміну валідація – це процес визначення ступеня, до якого модель є точним відображенням реального світу з точки зору її передбачуваного використання. Однак модель не може відображати всю «реальність», тому увага має бути зужена до тієї частини, яку модель має відображати. Однак перед моделлю не поставлено завдання ідеального всебічного вигляду. Насправді необхідно абстрагувати реальність «адекватно» для очікуваного використання моделі. Таким чином, валідація моделі відноситься до діяльності, призначеної для визначення корисності моделі, наприклад: міра, до якої модель придатна для використання за призначенням; чи

переваги від підвищення корисності моделі переважають витрати; чи допоможе це вам отримати кращі результати; наскільки добре працює певна модель порівняно з альтернативними моделями [2].

У науці моделювання може бути одним із етапів дослідження, необхідним для кращого розуміння природного явища. Моделі можуть бути особливо корисними при плануванні експериментів для перевірки гіпотез. Таким чином, методи розробки моделей і комп'ютерного моделювання стають центральною і природною частиною наукового методу. Моделі та відповідне комп'ютерне моделювання можуть бути корисними для прогнозування чи прийняття рішень, наприклад щодо зміни клімату, прогнозування погоди чи оцінки майбутніх змін у якості повітря чи води. Вони також можуть мати пояснювальну роль і можуть бути розроблені як частина спроби об'єднати всю доступну інформацію про конкретну природну систему в зручній і стислій формі опису,

до якої можуть отримати доступ дослідники з різних груп у всьому світі. Однак більш важливий тип застосування передбачає використання цих методів для підтримки процесу проектування та створення прототипів або для допомоги в процесі прийняття рішень. Моделі часто є життєво важливими для подолання компромісів у процесі проектування, а належним чином перевірені моделі та комп'ютерне моделювання тепер надають докази, які регулярно використовуються для забезпечення основи для сертифікації продуктивності, безпеки та надійності критично важливих для безпеки та цінних систем[3]. На рисунку 1 зображено життєвий цикл комп'ютерної моделі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Книга [1] є важливим джерелом інформації про верифікацію та валідацію комп'ютерних симуляційних моделей. Автор, D.J. Murray-Smith, є відомим вченим у галузі моделювання та симуляції. Книга пропонує глибокий огляд теоретичних аспектів, методів та практик верифікації та валідації.

У перших розділах книги розглядаються концептуальні аспекти моделювання, включаючи зв'язок між моделями та реальними системами. Автор пояснює значення точності та надійності моделей для успішного використання їх у різних сферах.

Після вступних розділів книга детально розглядає процес верифікації. Вона представляє різні методи верифікації, включаючи статичні та динамічні методи, і пояснює, як правильно перевірити, чи відповідає модель заданим специфіка-

ціям. Важливою частиною цього розділу є аналіз ризиків та непередбачених сценаріїв, які можуть вплинути на точність моделі.

Після цього книга переходить до розділу про валідацію моделей. Автор описує роль емпіричних даних у валідації та пояснює, як порівнювати поведінку моделі з реальними даними або даними з інших джерел. Важливою частиною цього розділу є також обговорення статистичних методів для оцінки точності моделей.

У всіх розділах книги надаються приклади успішного застосування моделей у різних галузях, таких як наука, техніка та бізнес. Ці приклади демонструють важливість верифікації та валідації для досягнення надійних та точних результатів.

Стаття [2] пропонує новий алгоритм для валідації моделей та має теоретичний та практичний підхід до проблеми. Автори статті включають D. Sornette, який відомий своїми дослідженнями в галузі статистичного фізики та економіки. Перша частина статті присвячена теоретичним аспектам валідації моделей. Автори пояснюють основні поняття та принципи, що лежать в основі їх алгоритму. Вони обговорюють необхідність забезпечення статистичної значущості даних та розглядають методи оцінки точності моделі. Далі наводяться приклади застосування алгоритму в різних областях, включаючи фізику, економіку та соціальні науки. Автори наводять результати експериментів, що підтверджують ефективність їхнього алгоритму та його спроможність забезпечувати точність та надійність моделей.

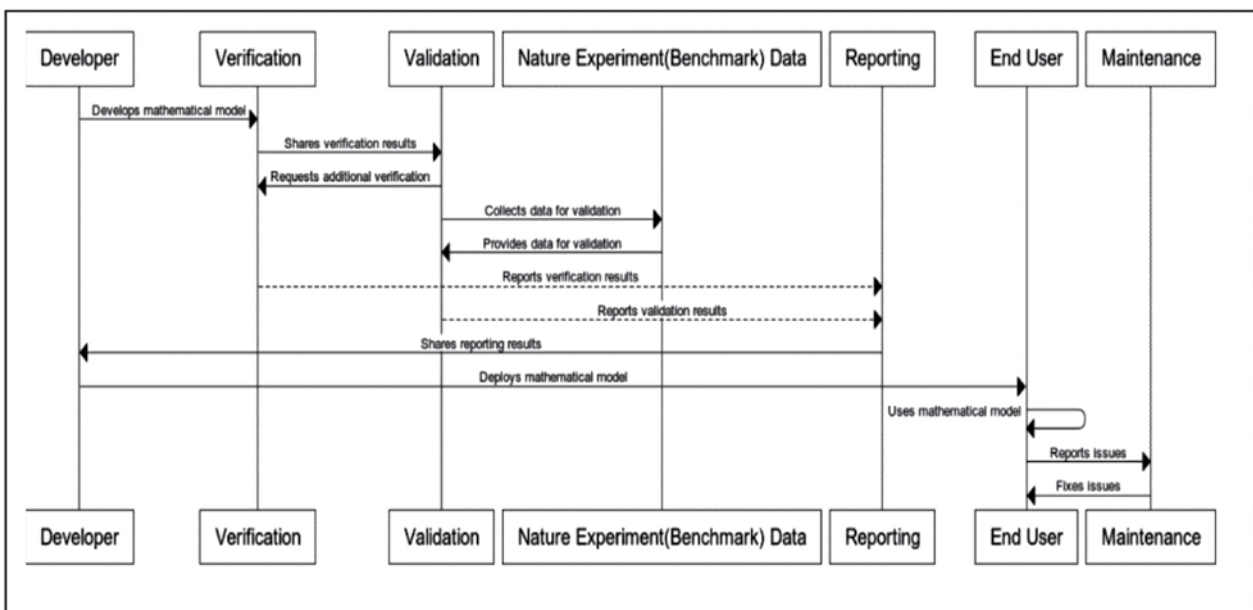


Рис. 1. Місце верифікації та валідації в життєвому циклі комп'ютерної моделі

Книга [3] зосереджена на якості програмного забезпечення та має практичний підхід до тестування та валідації програм. Автор, Jeff Tian, є досвідченим професіоналом в галузі якості програмного забезпечення. Книга починається з розділу, присвяченого основним поняттям та принципам тестування програмного забезпечення. Автор пояснює різні типи тестування та методи оцінки якості програм. Книга також містить розділи про валідацію програмного забезпечення. Вона пропонує різні методи валідації, включаючи формальну верифікацію та тестування на основі вимог. Автор надає приклади успішного застосування цих методів у різних проектах.

Стаття [8] спрямована на математичне та комп'ютерне моделювання електрооптичних систем. Автори розглядають підхід універсального моделювання та досліджують його застосування для електрооптичних систем. Стаття починається з огляду загальних принципів та методів універсального моделювання. Автори пояснюють, як цей підхід дозволяє забезпечити гнучкість та адаптивність моделей. Далі стаття переходить до розділу про застосування універсального моделювання для електрооптичних систем. Автори наводять конкретні приклади та результати моделювання, які демонструють ефективність їхнього підходу.

Загалом, всі джерела мають значимий внесок у галузь верифікації та валідації комп'ютерних моделей. Книга D.J. Murray-Smith надає комплексний огляд теоретичних та практичних аспектів процесу верифікації та валідації. Стаття D. Sornette та співавторів пропонує новий алгоритм для валідації моделей та демонструє його ефективність у різних галузях. Книга Jeff Tian спрямована на якість програмного забезпечення та має практичний підхід до тестування та валідації програм. Всі ці джерела можуть бути корисними для вчених, інженерів та дослідників, що працюють у галузі комп'ютерного моделювання та симуляції.

**Мета статті** – проаналізувати і пояснити важливість процесів верифікації та валідації комп'ютерних моделей для забезпечення їх точності та надійності у науці, техніці та бізнесі. Стаття розкриє основні поняття, методи та найкращі практики, пов'язані з цим процесом, а також висвітлить проблеми та виклики, що стикаються розробники. На основі успішних прикладів застосування моделей, стаття наголосить на важливості постійного вдосконалення та розширення знань для досягнення оптимальних результатів в різних сферах використання.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Верифікація – це процес забезпечення того, що комп'ютерна модель реалізована правильно й без помилок. Воно передбачає тестування окремих компонентів моделі, а також загальної поведінки моделі за низки умов. Перевірку можна виконати за допомогою різноманітних методів, включаючи аналітичні рішення, модульне тестування та перевірку коду.

Аналітичні рішення передбачають розв'язування математичних рівнянь вручну, щоб переконатися, що модель правильно реалізує заплановані алгоритми. Модульне тестування передбачає перевірку окремих компонентів моделі, таких як функції або підпрограми, щоб переконатися, що вони працюють належним чином. Огляд коду передбачає ретельний аналіз коду однією або декількома особами для виявлення будь-яких потенційних помилок або областей, які можна покращити.

Метою перевірки є виявлення та виправлення помилок у моделі перед її використанням для будь-яких програм. Це критично важливий крок у забезпеченні точності та надійності моделі, оскільки помилки в моделі можуть призвести до неправильних прогнозів і результатів.

Однією з проблем верифікації є складність комп'ютерних моделей, що може ускладнити виявлення та виправлення помилок. Крім того, результати моделі можуть бути дуже чутливими до невеликих змін у вхідних даних або припущеннях, тому важливо ретельно перевірити модель за низки умов.

Щоб подолати ці проблеми, найкращі практики верифікації включають використання кількох методів тестування та верифікації моделі, документування припущень та обмежень моделі та проведення незалежної верифікації особами, які не беруть участі в розробці моделі.

Загалом верифікація є критично важливим кроком у розробці комп'ютерних моделей, гарантуючи, що вони вільні від помилок і точно реалізують заплановані алгоритми. Завдяки ретельній перевірці розробники та користувачі можуть бути впевненими в результатах і прогнозах, створених цими потужними інструментами.

*Аналітична верифікація комп'ютерних моделей*

Аналітична верифікація – це техніка, яка використовується для перевірки правильності комп'ютерних моделей, зокрема тих, що базуються на математичних рівняннях, за допомогою аналітичних рішень. Техніка передбачає розв'язування рівнянь, представлених у моделі,

вручну, а потім порівняння результатів із результатами, отриманими за допомогою комп'ютерної моделі. Це порівняння допомагає виявити будь-які помилки або розбіжності в реалізації моделі.

Аналітична верифікація є потужною технікою, оскільки вона забезпечує точне розв'язання рівнянь, яке служить еталоном для перевірки точності моделі. Це особливо корисно для моделей, де рівняння добре зрозумілі та можуть бути розв'язані аналітично. Однак він може бути непридатним для більш складних моделей, де аналітичні рішення неможливі.

Незважаючи на свої обмеження, аналітична перевірка залишається важливою технікою перевірки комп'ютерних моделей. Це може допомогти виявити помилки в реалізації алгоритмів, перевірити припущення моделі та переконатися, що модель працює належним чином. Його також можна використовувати в поєднанні з іншими методами перевірки, такими як модульне тестування або перегляд коду, щоб отримати більш повну картину правильності моделі.

### *Перевірка моделі гібридних систем*

Перевірка моделі – це техніка для перевірки коректності програмного забезпечення та апаратних систем шляхом вичерпного дослідження всіх можливих дій системи щодо набору формальних специфікацій. Гібридні системи – це системи, які демонструють як безперервну, так і дискретну поведінку, наприклад кіберфізичні системи, які включають програмні компоненти, що взаємодіють із фізичними компонентами.

Перевірка моделі гібридних систем передбачає використання математичних моделей для представлення безперервної поведінки системи та моделей дискретних автоматів для представлення дискретної поведінки. Процес передбачає перевірку того, що модель гібридної системи задовольняє набір формальних специфікацій, таких як властивості безпеки, властивості живучості та властивості доступності.

У книзі «Засіб перевірки моделі для гібридних систем» Томаса А. Хензінгера, Пей-Сінь Хо та Говарда Вонг-Тою автори надають поглиблений огляд методів перевірки моделі для гібридних систем. Книга охоплює низку тем, пов'язаних із перевіркою моделі гібридних систем, включаючи мови моделювання, аналіз досяжності, перевірку безпеки та синтез керування.

Автори підкреслюють важливість перевірки моделі для перевірки правильності гібридних систем, особливо в критично важливих для безпеки додатках, таких як автомобільні системи, аерокос-

мічні системи та медичні пристрої. Вони також обговорюють проблеми, пов'язані з перевіркою моделі гібридних систем, включаючи складність моделей і потребу в ефективних алгоритмах.

Однією з ключових переваг моделі перевірки гібридних систем є її здатність забезпечити вичерпну та формальну перевірку поведінки системи. Перевірка моделі може допомогти переконатися, що система задовольняє бажані специфікації, і може ідентифікувати потенційні загрози безпеці або вразливі місця, які не можуть бути виявлені за допомогою традиційних методів тестування [10].

### *Формальна перевірка програмних систем*

Формальна верифікація – це методика перевірки коректності програмних систем за допомогою математичних методів. Він передбачає формальне визначення поведінки програмної системи за допомогою математичної моделі, а потім використання автоматизованих інструментів для перевірки відповідності системи специфікаціям.

Використання формальної перевірки стає все більш популярним у галузі розробки програмного забезпечення, особливо для критично важливих для безпеки систем, де помилки можуть мати серйозні наслідки. Формальна перевірка може допомогти виявити незначні помилки та вразливості, які неможливо виявити традиційними методами тестування.

У книзі «Інженерія якості програмного забезпечення» Джеффа Тіана автор надає поглиблений огляд методів і методів формальної перевірки. Книга охоплює широкий спектр тем, пов'язаних з формальною перевіркою, включаючи мови специфікацій, перевірку моделей, доведення теорем і сертифікацію програмного забезпечення.

Автор підкреслює важливість формальних методів у процесі розробки програмного забезпечення та надає вказівки щодо того, як інтегрувати формальну перевірку в життєвий цикл розробки програмного забезпечення. Він також обговорює переваги та обмеження формальної перевірки та дає практичні поради щодо ефективного використання формальних методів.

Однією з ключових переваг формальної перевірки є її здатність забезпечити математичний доказ правильності. Формальні методи можуть допомогти гарантувати, що системи програмного забезпечення не містять дефектів і вразливостей, і можуть забезпечити високий рівень впевненості, що система відповідає своїм специфікаціям. Однак формальна перевірка також може займати багато часу та потребуватиме спеціальних знань, що може ускладнити її реалізацію на практиці [9].

Валідація моделі – це процес оцінки точності, надійності та придатності комп'ютерної моделі для цілей. Він передбачає порівняння прогнозів або результатів моделі з реальними даними або спостереженнями, щоб визначити, наскільки добре модель представляє систему або явище, що моделюється. Мета валідації моделі – отримати впевненість у здатності моделі надавати точні та надійні результати.

Процес валідації моделі зазвичай включає такі кроки:

- Збір даних: релевантні дані збираються з реальних спостережень, експериментів або інших джерел, які представляють систему чи явище, що цікавить. Ці дані служать основою для порівняння з прогнозами моделі.

- Реалізація моделі: комп'ютерна модель розробляється або реалізується на основі набору припущень, математичних рівнянь, алгоритмів або інших методів представлення. Модель повинна точно відображати ключові особливості та поведінку системи, що моделюється.

- Порівняння з даними: прогнози або результати моделі порівнюються із зібраними даними. Для кількісної чи якісної оцінки узгодженості між моделлю та даними можна використовувати різні статистичні методи, такі як показники помилок, тести на відповідність або візуальний огляд.

- Аналіз чутливості: аналіз чутливості виконується, щоб зрозуміти, як змінюються прогнози моделі, коли змінюються ключові входні параметри або припущення. Це допомагає визначити найвпливовіші фактори та оцінити стійкість моделі.

- Уточнення та ітерація моделі: на основі результатів процесу перевірки модель може потребувати уточнення або коригування для підвищення її точності. Це може передбачати перегляд припущень моделі, оцінку параметрів або оновлення структури моделі.

- Документування та звітність: процес перевірки, включаючи використані дані, методи аналізу, результати та будь-які обмеження чи невизначеності, документується та звітується. Це забезпечує прозорість і створює базу для майбутніх користувачів моделі або рецензентів для розуміння та оцінки валідності моделі.

- Валідація моделі є ітераційним процесом, і для досягнення задовільного рівня впевненості в продуктивності моделі може знадобитися кілька циклів перевірки. Це важливо для зміцнення довіри до результатів моделі та для підтримки процесів прийняття рішень у різних сферах, вклю-

чаючи техніку, фінанси, науку про навколишнє середовище та охорону здоров'я.

#### *Кількісна перевірка*

Кількісні методи валідації важливі для перевірки точності та ефективності комп'ютерних моделей. Ці методи можна класифікувати по-різному, але одна загальна категорія включає п'ять категорій: прості методи прогнозування, методи, засновані на ідентифікації системи та оцінці параметрів, методи, засновані на бар'єрних сертифікатах, методи спотворення моделі та методи, засновані на аналізі чутливості параметрів [4].

- Прості методи прогнозування: ці методи включають порівняння прогнозів моделі з фактичними даними. Одним із поширених підходів є використання статистичних методів для порівняння прогнозованих значень моделі з фактичними значеннями, такими як середня квадратична помилка або коефіцієнт кореляції.

- Методи, засновані на ідентифікації системи та оцінці параметрів: Ці методи включають ідентифікацію параметрів моделі та оцінку їх значень на основі даних. Потім оцінені параметри використовуються для оцінки точності моделі. Приклади цих методів включають оцінку максимальної правдоподібності та байєсівський висновок.

- Методи, засновані на бар'єрних сертифікатах: ці методи включають визначення меж можливої поведінки моделі та порівняння цих границь із фактичною поведінкою, що спостерігається в даних. Бар'єрні сертифікати – це математичні функції, які можна використовувати для визначення цих меж.

- Методи спотворення моделі: ці методи передбачають введення помилок або збурень у модель та оцінку реакції моделі на ці збурення. Приклади цих методів включають моделювання Монте-Карло та аналіз чутливості.

- Методи, засновані на аналізі чутливості параметрів: ці методи передбачають зміну параметрів моделі в діапазоні значень і оцінку чутливості прогнозів моделі до цих змін. Це може допомогти визначити найважливіші параметри в моделі та оцінити їхній вплив на прогнози моделі.

#### *«Фейс» валідація*

Альтернативою попередньому методу є «фейс» перевірка, яка може бути дуже корисною для встановлення того, чи правильна логіка концептуальної моделі та чи виглядають обґрунтованими співвідношення «вихід-вихід» для моделі. Це може бути особливо корисним на ранніх етапах інженерного проектування та розробки проекту, коли немає прототипу системи, доступного

для тестування. На більш пізньому етапі розробки моделі, після проведення деякої кількісної перевірки, іноді можна повторно ввести елемент «фейс» перевірки, запитавши системних експертів, чи можуть вони відрізнити виміряну систему від результату моделювання [5].

### *Підходи на основі порівняння з іншими моделями*

Підходи, засновані на порівняннях з іншими моделями, передбачають порівняння результатів нової моделі з результатами попередньо валідованих моделей або підсистем. Ці порівняння можуть надати корисну інформацію про точність і валідність нової моделі. Існує два основні методи для цих порівнянь: використання тимчасових модифікацій для представлення попередньої системи та перевірка історичних даних.

Використання тимчасових модифікацій передбачає модифікацію нової моделі для представлення повністю перевіреної та підтверженої моделі з попереднього проекту, яка схожа на новий проект. Порівнюючи результати нової моделі з результатами існуючої перевіреної моделі для тих самих вхідних даних і початкових умов, можна отримати уявлення про точність і валідність нової моделі.

Перевірка історичних даних передбачає використання результатів перевірки, отриманих під час тестування підсистем, які використовувалися в попередніх проектах і використовуються повторно або дуже схожі на підсистеми в новому проекті. Порівнюючи результати нової моделі з результатами перевірки, отриманими в попередніх проектах, можна оцінити точність і валідність нової моделі.

Обидва ці підходи мають свої переваги та обмеження. Тимчасові модифікації можуть забезпечити точніші порівняння між новою моделлю та існуючими перевіреними моделями, але також можуть потребувати багато часу та витрат. Перевірка історичних даних може бути менш дорогою та трудомісткою, але може не забезпечити настільки точне порівняння через відмінності в підсистемах, які використовувалися в попередніх проектах і поточному проекті. Тому важливо ретельно оцінити переваги та обмеження кожного підходу, перш ніж вирішити, який з них використовувати [6].

### *Набори даних для тестування моделі*

Щоб перевірити продуктивність математичної моделі, можна використовувати широкий спектр наборів даних. Ці набори даних можна класифікувати за різними категоріями, такими як синтетичні дані, лабораторні дані, польові дані та історичні дані. Синтетичні дані генеруються

самою моделлю і можуть використовуватися для перевірки результатів моделі. Лабораторні дані збираються в контрольованих умовах у лабораторних умовах, і їх можна використовувати для перевірки поведінки моделі в контрольованому середовищі. Польові дані збираються в реальних умовах і можуть використовуватися для перевірки поведінки моделі в реальних умовах. Історичні дані збираються з попередніх експериментів і можуть використовуватися для перевірки поведінки моделі з часом.

Незалежно від типу набору даних, який використовується, важливо переконатися, що зібрані дані точні, точні та відповідають моделі, що тестується. Це можна зробити шляхом ретельного планування експерименту, вибору відповідних методів вимірювання та перевірки даних за допомогою повторних експериментів [7].

### *Перевірка підмоделей і загальних моделей*

Під час включення моделі в бібліотеку підмоделей надзвичайно важливо переконати користувачів у довірі до процесів верифікації та перевірки, які проводилися під час включення моделі в бібліотеку. Ця впевненість життєвоважлива для забезпечення придатності та надійності моделі для конкретних застосувань. Щоб досягти цього, дуже важливо, щоб бібліотечні моделі були ретельно задокументовані, щоб надати чітку інформацію про характеристики, можливості та обмеження моделі.

Вичерпна документація дозволяє користувачам легко відповідати на будь-які запитання чи сумніви щодо придатності конкретної моделі для конкретного застосування. Документація повинна включати детальну інформацію про процеси верифікації та валідації, які пройшла модель, у тому числі використані методології, техніки та критерії. Ця прозорість дозволяє користувачам зрозуміти ступінь тестування та перевірки, виконаної на моделі, полегшуючи прийняття обґрунтованих рішень.

Крім документації, також важливо надати детальну інформацію про критерії прийнятності, які використовуються для включення моделі в бібліотеку. Ця інформація допомагає користувачам зрозуміти стандарти та вимоги, яким повинна відповідати модель, щоб вважатися придатною для включення. Маючи доступ до цих критеріїв прийнятності, користувачі можуть оцінити релевантність моделі та застосовність до своїх конкретних потреб.

Забезпечуючи ретельну документацію та наявність критеріїв прийнятності, бібліотека підмо-

делей вселяє довіру користувачів до моделей, які вона пропонує. Ця впевненість сприяє успішному використанню моделей і дозволяє користувачам приймати обґрунтовані рішення щодо їх придатності для конкретних застосувань.

Таким чином, перевірка підмоделей і загальних моделей у бібліотеці вимагає повної документації та чіткої наявності критеріїв прийнятності. Ці заходи дозволяють користувачам мати впевненість у процесах верифікації та валідації, що проводяться на моделях, і приймати обґрунтовані рішення щодо їх придатності для конкретних застосувань [8].

**Висновки.** Підсумовуючи, верифікація та валідація комп'ютерної моделі є ключовими процесами, які забезпечують точність і надійність обчислювальних моделей, що використовуються в різних сферах. Верифікація передбачає перевірку правильності впровадження моделі, тоді як валідація передбачає оцінку точності та релевантності прогнозів моделі порівняно з реальними спостереженнями.

Існує кілька підходів до верифікації та валідації комп'ютерної моделі, включаючи аналітичну верифікацію, формальну верифікацію, перевірку обличчя, порівняння з іншими моделями та набори даних для тестування моделі. Кожен підхід має свої сильні та слабкі сторони та підходить для різних типів моделей і застосувань.

Процес верифікації та валідації має бути вичерпним, задокументованим і прозорим, щоб переконалися, що модель підходить для своєї мети. Також важливо перевіряти та підтверджувати підмоделі та загальні моделі, щоб забезпечити їх надійність і точність при використанні у великих моделях.

Хоча неможливо досягти ідеальної верифікації та підтвердження, важливо дотримуватися встановлених найкращих практик і використовувати комбінацію підходів для підвищення впевненості в результатах моделі. Належна верифікація та валідація можуть допомогти запобігти дорогим помилкам і підвищити довіру до обчислювальних моделей, що призведе до кращого прийняття рішень і точніших прогнозів у різних сферах.

#### Список літератури:

1. D.J. Murray-Smith. Testing and Validation of Computer Simulation Models, Simulation Foundations, Methods and Applications. Springer International Publishing Switzerland, pp. 1–20.
2. D. Sornette, A. B. Davis, K. Ide, K. R. Vixie, V. Pisarenko, and J. R. Kamm. Algorithm for model validation: Theory and applications, pp 1–2 <https://doi.org/10.1073/pnas.0611677104>.
3. Bruce A. McCarl. Model Validation: An Overview with some Emphasis on Risk Models. The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library, pp. 1–5.
4. Prajna S. Barrier certificates for nonlinear model validation. In: Proceedings 42nd IEEE conference on decision and control 9–12 Dec 2003, vol. 3, pp. 3–4.
5. Bryce GW, Agnew PW. On-site investigation of electrohydraulic governors for water turbines, pp. 35–44.
6. The Mitre Corporation. Verification and validation of simulation models. In: Mitre systems engineering guide, pp. 461–469 <https://www.mitre.org/publications/technical-papers/themitre-systems-engineering-guide>.
7. Hemez F.M. The myth of science-based predictive modelling. In: Proceedings foundations'04 workshop for verification, validation and accreditation (VV&A) in the 21st century, Arizona State University, Tempe, pp. 17–17.
8. Smith M.I., Murray-Smith DJ, Hickman D. Mathematical and computer modeling of electro-optic systems using a generic modeling approach. J Def Model Simul.SS, pp. 47–60.
9. Jeff Tian. Software Quality Engineering. Wiley-IEEE Computer Society Press; 1st edition, pp. 24–70.
10. Henzinger, T.A., Ho, PH., Wong-Toi, H. HYTECH: A model checker for hybrid systems. In: Grumberg, O. (eds) Computer Aided Verification. CAV 1997. Lecture Notes in Computer Science, vol 1254. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/3-540-63166-6\\_48](https://doi.org/10.1007/3-540-63166-6_48).
11. Mauro Pezze, Bicocca. Software Testing and Analysis: Process, Principles, and Techniques. pp. 3–6.

#### Heiko O.O. ENSURING CORRECTNESS OF COMPUTER MODELS THROUGH VERIFICATION AND VALIDATION

*The article is devoted to the importance of the processes of verification and validation of computer models, which are used to simulate and predict the behavior of complex systems in science, technology and business. It reveals key aspects of these processes and their importance in ensuring the accuracy and reliability of models. Computer models help to predict, analyze and optimize the behavior of various systems, from physical objects to economic processes. The relevance of the article is that unreliable or poorly validated models can lead to wrong decisions, loss of resources and even danger to life and health. Confidence in computer models depends on their plausibility and accuracy. Much of this confidence comes from the process of model verification and validation.*

*Verification is checking that the model meets the specified specifications and correctly implements certain aspects of the system. After successful verification, the model has the correct structure and should function correctly from a technical point of view. Validation, on the other hand, involves comparing the behavior model with real-world data or other independent sources to ensure that the model correctly captures real-world conditions. This process of expanding the application accuracy and reliability of the model. The verification and validation process can be complex, and it can depend on the type of model and its intended use. One of the problems associated with verification and validation is insufficient data or a mismatch between the data and the real system. This can affect the accuracy of the model and lead to inaccurate predictions. Best practices include conducting summary data analysis for model verification and selecting adequate metrics for validation. Additionally, developers should document the verification and validation process to ensure transparency and repeatability. In conclusion, verification and validation are critical steps in the development of computer models to ensure their accuracy and reliability. It was also noted that achieving the best results requires continuous improvement and adherence to best practices in the process of developing and applying models.*

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