

УДК 004.896

О.О. ТИМАШОВ*, Є.В. ЄЛІСЄЄВА*, Л.І. КУРЗАНЦЕВА*

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ У НАПІВНАТУРНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

*Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. У статті досліджено можливості використання цифрових двійників у системах напівнатурного моделювання транспортних систем, зокрема засобів гусеничного типу. Актуальність роботи зумовлена зростанням складності сучасних транспортних об'єктів, необхідністю підвищення точності моделювання їх динаміки, скорочення витрат на натурні випробування та забезпечення підтримки прийняття рішень у режимі, наближеному до реального часу. Метою дослідження є систематизація типів цифрових двійників, аналіз їх структурних і функціональних особливостей та визначення найбільш придатної структури для застосування в системах напівнатурного моделювання транспортних засобів. У роботі використано методи порівняльного аналізу сучасних наукових публікацій, структурного узагальнення, системного зіставлення типів цифрових двійників за критеріями взаємодії з фізичним об'єктом, роботи в реальному часі, здатність до прогнозування, адаптації та підтримки керування. Запропоновано класифікацію цифрових двійників для задач напівнатурного моделювання, яка включає статичний, динамічний, прогностичний, інтелектуальний, інтелектуально-динамічний та когнітивний типи. Для кожного типу визначено характерні функції, основні структурні компоненти, рівень інтеграції із системою напівнатурного моделювання та потенційну сферу застосування. Показано, що статичні цифрові двійники доцільні як базовий рівень цифрового представлення об'єкта; динамічні — для відтворення поведінки системи у реальному часі; прогностичні — для оцінювання майбутніх станів і ризиків відмов; інтелектуальні — для адаптації моделей і підтримки прийняття рішень; когнітивні — як перспективний напрям подальшого розвитку. Обґрунтовано, що для задач напівнатурного моделювання транспортних систем найбільш доцільним є інтелектуально-динамічний цифровий двійник, який забезпечує поєднання детального динамічного моделювання, синхронізації в реальному часі, адаптивного аналізу, прогнозування та формування керуючих рішень.

Ключові слова: цифровий двійник, напівнатурне моделювання, HIL, транспортні системи, гусеничні транспортні засоби, статичний цифровий двійник, динамічний цифровий двійник, прогностичний цифровий двійник, інтелектуальний цифровий двійник, інтелектуально-динамічний цифровий двійник.

Abstract. The paper examines the use of digital twins in hardware-in-the-loop (HIL) modeling of transport systems with a particular focus on tracked vehicles. The relevance of the study is determined by the growing complexity of modern transport objects, the need to improve the accuracy of dynamic modeling, reduce the cost of full-scale tests, and support decision-making under near real-time conditions. The aim of the research is to systematize the types of digital twins, analyze their structural and functional features, and justify the choice of the most appropriate structure for HIL-based vehicle modeling. The study uses methods of comparative analysis of recent scientific publications, structural generalization, and a systematic comparison of digital twin types based on criteria including interaction with the physical object, real-time operation, predictive capability, adaptability, and control support. A classification of digital twins for HIL tasks is proposed, including static, dynamic, predictive, intelligent, intelligent-dynamic, and cognitive types. For each type, the main functions, structural components, the level of integration with the HIL system, and potential field of application are identified. It is shown that static digital twins are suitable as a basic level of digital representation: dynamic twins ensure real-time behaviour reproduction; predictive twins are intended for predicting future states and failures; intelligent twins provide adaptive analytics and decision support; and cognitive twins represent a promising but still insufficiently mature direction

for real-time HIL applications. The study substantiates that the intelligent-dynamic digital twin is the most appropriate architecture for HIL modeling of transport systems because it combines detailed dynamic modeling, real-time synchronization, adaptive analysis, prediction, and control decision generation.

Keywords: digital twin, hardware-in-the-loop (HIL) modeling, transport systems, tracked vehicles, static digital twin, dynamic digital twin, predictive digital twin, intelligent digital twin, intelligent-dynamic digital twin.

DOI: 10.34121/1028-9763-2026-3-89-102

1. Вступ

Сучасні технічні системи, зокрема транспортні засоби, енергетичні установки, військові системи тощо, характеризуються складною структурою, зростанням кількості взаємопов'язаних підсистем, багатофункціональністю та підвищенням вимог до надійності, безпеки та ефективності функціонування. Особливо це стосується транспортних засобів із підвищеною прохідністю, включаючи засоби гусеничного типу, функціонування яких визначається складними нелінійними процесами взаємодії рушія з опорною поверхнею, впливом умов експлуатації та різноманітністю навантажень. Для створення таких систем необхідні нові ефективні методи розробки та тестування.

Одним із перспективних напрямів дослідження і випробування таких систем є напівнатурне моделювання (Hardware-in-the-Loop, HIL), яке поєднує реальні фізичні компоненти з віртуальною моделлю середовища або частини об'єкта. Такий підхід дає змогу тестувати алгоритми керування, аналізувати критичні режими роботи, досліджувати аварійні сценарії та перевіряти поведінку системи без ризику пошкодження дорогого обладнання [1–4]. Ефективність HIL-моделювання значною мірою визначається якістю математичних моделей і рівнем їх синхронізації з реальною апаратною частиною. У зв'язку з цим важливого значення набуває концепція цифрового двійника (ЦД) як динамічного цифрового представлення фізичного об'єкта, здатного відображати його стан, поведінку та еволюцію у часі. Сучасні дослідження демонструють, що інтеграція HIL та Digital Twin відкриває можливості для побудови єдиного середовища розробки, випробування, моніторингу та підтримки прийняття рішень [5–10].

Разом із тим у наявних публікаціях недостатньо систематизовано типи цифрових двійників саме з позицій їх придатності до задач напівнатурного моделювання транспортних систем. У науковій літературі переважно розглядаються окремі аспекти цифрових двійників — динамічне моделювання, прогнозування, інтелектуальна аналітика чи когнітивні функції — без формування узгодженого підходу до вибору архітектури цифрового двійника для HIL-систем реального часу.

2. Актуальність роботи

Систематизація типів цифрових двійників для задач напівнатурного моделювання є актуальною з теоретичної та практичної точок зору. Вона дозволяє: сформувати узгоджене уявлення про еволюцію цифрових двійників від статичних моделей до інтелектуалізованих адаптивних систем; обґрунтувати вибір структури цифрового двійника залежно від вимог до реального часу, прогнозування та керування; зменшити ризик помилкового вибору архітектури при створенні HIL-стендів для транспортних систем. Для транспортних засобів гусеничного типу ця проблема має особливу вагу, оскільки їх моделювання пов'язане з високою нелінійністю динаміки, змінною взаємодією з ґрунтом і значними обчислювальними навантаженнями.

Тому систематизація типів цифрових двійників для відтворення поведінки об'єкта в системах напівнатурного моделювання з метою підвищення точності та ефективності моделювання транспортних засобів є актуальною.

3. Мета дослідження

Метою дослідження є систематизація типів цифрових двійників для задач напівнатурного моделювання транспортних засобів, аналіз їх структурних і функціональних особливостей та обґрунтування вибору оптимальної структури для використання в системах реального часу.

4. Класифікація цифрових двійників для систем напівнатурного моделювання

На сьогодні у науковій літературі не існує єдиної загальноприйнятої класифікації цифрових двійників, придатної саме для систем напівнатурного моделювання транспортних об'єктів. З урахуванням аналізу сучасних публікацій та вимог до НІЛ-систем доцільно розглядати шість типів цифрових двійників: статичний, динамічний, прогностичний, інтелектуальний, інтелектуально-динамічний та когнітивний [11–35]. Основними критеріями їх розмежування є характер зв'язку з фізичним об'єктом; можливість роботи в реальному часі; здатність до відтворення динаміки процесів; можливість прогнозування майбутніх станів; наявність інтелектуальної аналітики та адаптації; рівень придатності до інтеграції з НІЛ-стендом.

Такий підхід відображає еволюцію цифрових двійників — від базових цифрових моделей, що виконують функції опису та конфігураційної підтримки, до складних інтелектуалізованих систем, здатних не лише відтворювати поведінку об'єкта в реальному часі, а й прогнозувати його стан, адаптувати параметри моделі та формувати керуючі рішення. Узагальнену класифікацію цифрових двійників для задач НІЛ-моделювання наведено на рис. 1 [12–35].

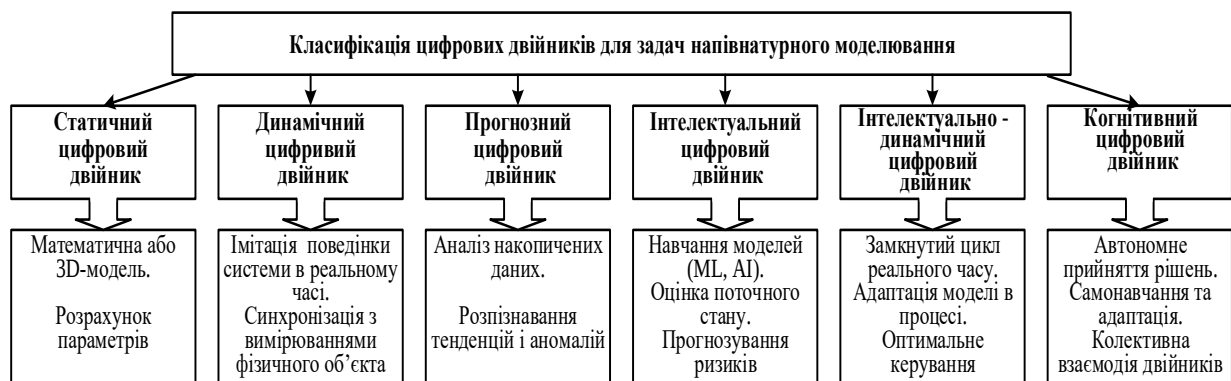


Рисунок 1 — Класифікація цифрових двійників для задач напівнатурного моделювання

У роботі наведено узагальнені структури обраних типів цифрових двійників (рис. 2 – 6). Для кожного ЦД було виділено найважливіші компоненти, які відображають функціональні особливості та відмінні характеристики даного типу цифрового двійника.

Статичний цифровий двійник (Digital Model, Static Digital Twin, Offline Digital Twin) є найпростішою формою цифрового представлення об'єкта. Він відображає геометричну, параметричну та функціональну структуру системи, але не забезпечує повноцінного зв'язку з фізичним об'єктом у реальному часі. Такий двійник доцільно використовувати як базовий рівень цифрового представлення, цифровий паспорт виробу або конфігураційну основу для подальшого переходу до більш складних типів цифрових двійників [12–15].

У системах напівнатурного моделювання (СНМ) транспортних засобів статичний цифровий двійник (СЦД) може застосовуватися на ранніх етапах проєктування: для аналізу конструкції, формування карти сигналів та інтерфейсів, побудови геометричних і фізичних моделей вузлів, перевірки конфігурацій, підготовки параметрів для налаштування

регуляторів і сценаріїв випробувань. Його основними перевагами є простота реалізації та невисокі обчислювальні витрати, а головним обмеженням є відсутність часової синхронізації та адаптації. Узагальнену структуру статичного цифрового двійника наведено на рис. 2 [13, 14]. До складу структури входять такі компоненти:

- модуль вхідних даних (1) забезпечує введення початкових параметрів, умов випробувань та характеристик об'єкта моделювання;
 - математична модель об'єкта (2) – цифрове представлення конструкції та поведінки гусеничного транспортного засобу на основі диференціальних рівнянь, логічних моделей та функціональних залежностей;
 - база фіксованих параметрів (3) містить характеристики транспортного засобу (номінальні значення, паспортні дані та розрахункові коефіцієнти);
 - модуль конфігураційного управління версіями (4) призначено для зберігання версій моделей, параметрів та сценаріїв випробувань;
 - середовище імітаційного моделювання (5) здійснює виконання математичної моделі, відтворення сценаріїв випробувань та аналіз результатів моделювання;
 - хмарне сховище (6) зберігає конфігурації, параметри та результати випробувань.
- Для СЦД сховище не є обов'язковим, оскільки модель працює, в основному, з фіксованими параметрами.

У СНМ гусеничних транспортних засобів СЦД може використовуватися для формування початкової моделі під час ініціалізації системи; для аналізу кінематики підвіски; моделювання силових навантажень; розрахунків міцності та ресурсу вузлів. Також двійник використовується для формування структурної схеми ходової частини; схеми силової установки; конфігурації трансмісії; топології бортових систем управління, що дозволить сформувати карту сигналів та інтерфейсів до підключення динамічних моделей руху.

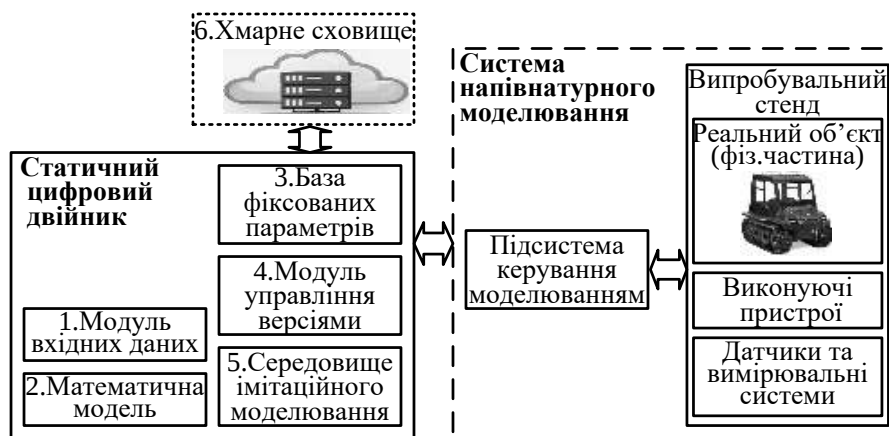


Рисунок 2 — Узагальнена структура статичного цифрового двійника для напівнатурного моделювання транспортних засобів

Динамічний цифровий двійник (Dynamic Digital Twin) забезпечує відтворення поведінки об'єкта у часі та підтримує двосторонній обмін даними з фізичною системою [5]. Двійник розширює можливості статичних двійників завдяки впровадженню таких механізмів, як моделювання поведінки об'єкта в реальному часі; адаптація до мінливих умов; урахування поточних параметрів і зовнішніх впливів; тестування взаємодії апаратних компонентів із моделлю. Саме цей тип цифрового двійника становить основу класичного поєднання Digital Twin і HIL, оскільки дозволяє реалізувати синхронізацію зі стендом, моделювання перехідних процесів, аналіз режимів навантаження та імітацію роботи окремих підсистем у реальному часі [8, 9, 16, 17].

Для транспортних систем гусеничного типу динамічний цифровий двійник (ДЦД) особливо цінний завдяки можливості моделювати взаємодію рушія з ґрунтом, зміну тягового зусилля, коливання підвіски, перерозподіл навантажень, зміну режимів трансмісії та реакцію системи на зовнішні збурення. Його основним недоліком є обмеженість адаптивних і інтелектуальних функцій: за значних параметричних змін або в умовах невизначеності та шумів такий двійник потребує додаткових механізмів корекції.

Узагальнену структуру ДЦД наведено на рис. 3 [3, 4, 16, 17]. До її складу входять такі компоненти:

- модуль збору та інтеграції даних (1) відповідає за збір, фільтрацію та синхронізацію даних від датчиків, вимірювальних систем та стенду;
- динамічна модель об'єкта (2) описує поведінку системи в часі з урахуванням динаміки руху;
- база параметрів і конфігурації моделі (3) зберігає параметри машини, характеристики ґрунту та режими випробувань тощо;
- середовище імітаційного моделювання (4) реалізує виконання моделі в реальному або прискореному часі, керує обчисленнями та синхронізацією процесів;
- модуль обчислювального ядра реального часу (5) здійснює виконання моделі з фіксованим часовим кроком;
- модуль синхронізації реального часу (6) виконує узгодження часових циклів цифрового двійника та системи ПМ;
- хмарне сховище (7) здійснює централізоване зберігання телеметрії, параметрів моделі, результатів випробувань та версій конфігурації для подальшого аналізу й верифікації моделі.



Рисунок 3 — Узагальнена структура динамічного цифрового двійника для напівнатурного моделювання транспортних засобів

Прогностичний цифровий двійник (Predictive Digital Twin) є розвитком динамічного підходу у напрямі передбачення майбутніх станів системи. Окрім відтворення поточного режиму роботи, він використовує історичні дані, поточні вимірювання та модулі предиктивної аналітики для оцінювання ризиків відмов, залишкового ресурсу компонентів, тенденцій деградації та можливих сценаріїв функціонування [18–22].

У НІЛ-моделюванні транспортних засобів прогностичний цифровий двійник (ПЦД) доцільний як компонент інтелектуальної надбудови над динамічною моделлю. Його засто-

сування є особливо важливим для аналізу тривалих режимів навантаження, оцінювання ресурсу гусениць, опорних котків і вузлів трансмісії, а також формування рекомендацій щодо технічного обслуговування та налаштування параметрів руху. Водночас ПЦД не завжди забезпечує жорстку часову детермінованість, необхідну для задач реального часу. Узагальнену структуру цього двійника наведено на рис. 4 [19–22]. До складу структури ПЦД входять такі компоненти:

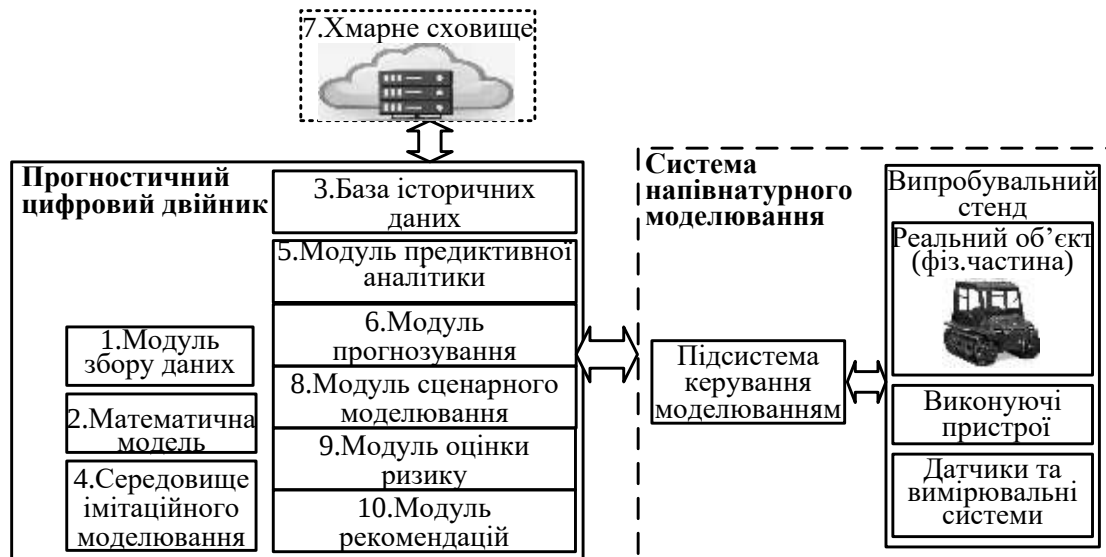


Рисунок 4 — Узагальнена структура прогностичного цифрового двійника для напівнатурного моделювання транспортних засобів

- модуль збору та інтеграції (1) даних здійснює збір, фільтрацію та об'єднання поточних, історичних і телеметричних даних від СНМ;
- математична модель об'єкта (2) відтворює поведінку транспортного засобу;
- база історичних даних (3) зберігає архіви телеметрії, параметри роботи, режими експлуатації та результати попередніх випробувань для виявлення закономірностей;
- середовище імітаційного моделювання (4) виконує проведення випробувань;
- модуль предиктивної аналітики (5) аналізує дані та виявляє тенденції деградації, відхилень і можливих відмов;
- модуль прогнозування (6) формує прогнози технічного стану, ресурсу компонентів;
- хмарне сховище (7) відіграє важливу роль, накопичує великі масиви історичних даних, необхідних для предиктивної аналітики, оцінки ресурсу та прогнозування відмов;
- модуль сценарного моделювання (8) здійснює моделювання різних експлуатаційних умов та оцінку наслідків різних режимів руху;
- модуль оцінки ризиків (9) визначає ймовірність відмов, залишковий ресурс та критичні режими функціонування;
- модуль рекомендацій формує пропозиції щодо технічного обслуговування, налаштування параметрів та запобігання відмовам.

Інтелектуальний цифровий двійник (Intelligent Digital Twin) поєднує математичну модель об'єкта з алгоритмами штучного інтелекту, машинного навчання та інтелектуального аналізу даних. Його призначення полягає у виявленні аномалій, адаптації параметрів моделі, самооновленні окремих компонентів цифрового представлення та підтримці прийняття рішень в умовах неповної або зашумленої інформації [23–27].

Для транспортних систем такий підхід є ефективним під час діагностики, адаптації моделі до типу ґрунту, інтелектуального вибору режимів руху, виявлення деградації окремих вузлів, енергоефективної оптимізації. Однак у чистому вигляді інтелектуальний цифровий двійник (ІЦД) не завжди є достатнім для НІЛ-моделювання, оскільки акцентує увагу на аналітичному та адаптивному аспектах, а не на детермінованому відтворенні фізичної динаміки у реальному часі. Узагальнену структуру ІЦД наведено на рис. 5 [8, 23–27]. До складу входять такі компоненти:

- модуль збору та інтеграції даних (1) виконує збір, фільтрацію та об'єднання даних, що надходять від СНМ, датчиків та зовнішніх джерел;
- математична модель об'єкта (2) — цифрове представлення конструкції, характеристик та поведінки транспортного засобу;
- модуль аналітичний AI (3) здійснює аналіз даних, ідентифікацію станів, виявлення аномалій та адаптацію параметрів моделі;
- середовище імітаційного моделювання (4) реалізує виконання моделей та проведення віртуальних випробувань об'єкта;
- модуль прогнозування (5) оцінює можливі зміни технічного стану оцінки стійкості та прогнозує майбутні режими роботи об'єкта, відмови та деградації;
- модуль прийняття рішень (6) формує рекомендації з управління, діагностики та коригування параметрів випробувань;
- хмарне сховище (7) зберігає результати інтелектуального аналізу, моделей машинного навчання та даних адаптації ІЦД.

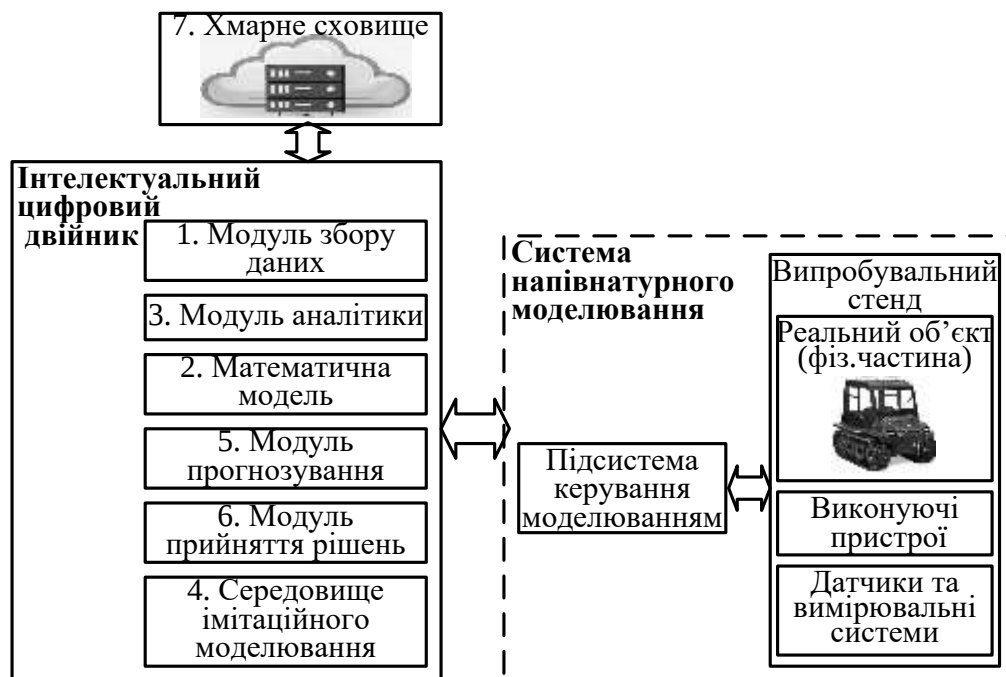


Рисунок 5 — Узагальнена структура інтелектуального цифрового двійника для напівнатурного моделювання транспортних засобів

Інтелектуально-динамічний цифровий двійник є найбільш розвиненою і збалансованою архітектурою для задач НІЛ-моделювання. В англійськомовних наукових джерелах цей тип цифрового двійника часто називають «Intelligent Dynamic Digital Twin», «AI-powered Digital Twin» або «Cognitive Digital Twin». Він поєднує динамічну модель об'єкта, що працює в реальному часі, з інтелектуальними модулями аналізу, адаптації, прогнозування та підтримки прийняття рішень. Як наслідок, такий ІЦД здатний не лише синхронно взаємоді-

яти зі стендом і відтворювати поведінку об'єкта, а й компенсувати розбіжності між моделлю та фізичною системою, виявляти аномалії та формувати керуючі впливи [28–32].

Для гусеничних транспортних засобів цей тип двійника є найбільш доцільним, оскільки дозволяє одночасно моделювати динаміку руху, взаємодію з ґрунтом, адаптацію до змінних умов, прогноз технічного стану ходової частини, оптимізацію тягових режимів і підтримку випробувань у складних сценаріях без ризику для обладнання. Узагальнену структуру цього двійника наведено на рис. 6 [28–33]. До складу входять такі компоненти:

- модуль збору та інтеграції даних (1) виконує збір, фільтрацію та об'єднання даних, що надходять від системи НМ, датчиків та зовнішніх джерел;
- динамічна модель об'єкта (2) визначає поведінку системи з урахуванням руху;
- модуль аналітики (3) забезпечує ідентифікацію параметрів, адаптацію параметрів моделі, аналіз станів, виявлення аномалій та підтримку прийняття рішень;
- середовище імітаційного моделювання (4) забезпечує виконання моделі в реальному часі, обмін сигналами між цифровим двійником та апаратною частиною й інтеграцію цифрового двійника зі стендом напівнатурного моделювання;
- модуль обчислювального ядра реального часу (5) здійснює виконання обчислень із тимчасовим детермінованим кроком для підтримки взаємодії з апаратною частиною стенду;
- модуль синхронізації реального часу (6) реалізує узгодження обчислювального часу цифрового двійника з тимчасовим циклом напівнатурної системи моделювання;
- хмарне сховище та система управління конфігурацією (7, 10) виконують зберігання даних, версій моделей, сценаріїв випробувань та результатів моделювання;
- модуль прогнозування та прийняття рішень (8) формує прогнози технічного стану, ресурсу вузлів, відмов та оптимальні керуючі впливи для системи;
- модуль адаптивного управління (9) формує та коригує керуючі впливи на основі поточного стану моделі та результатів інтелектуального аналізу.

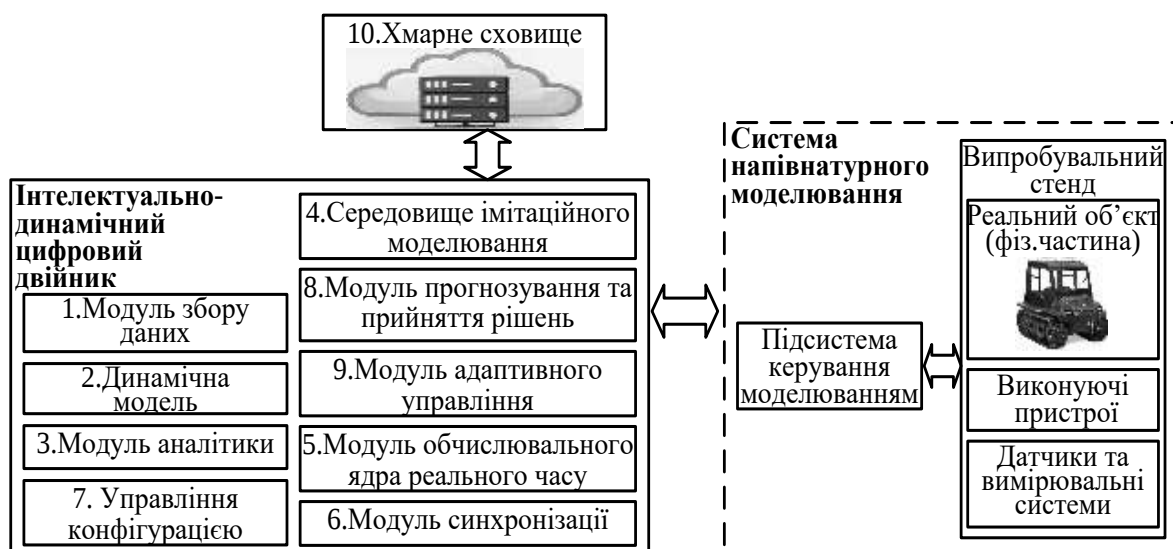


Рисунок 6 — Узагальнена структура інтелектуально-динамічного цифрового двійника для напівнатурного моделювання транспортних засобів

Когнітивний цифровий двійник (Cognitive Digital Twin) є перспективним напрямом розвитку цифрових двійників і розглядається як архітектура, здатна до автономного аналізу ситуації, семантичної інтерпретації даних, причинно-наслідкового міркування та координації з іншими цифровими сутностями. Цей тип ЦД ще називають автономним або колаборативним / мультиагентним (Autonomous Digital Twin, Collaborative Digital Twin /

Multi-agent Digital Twin або Multi-Agent System-based Digital Twin). На концептуальному рівні когнітивні цифрові двійники мають значний потенціал для побудови самоорганізованих виробничих і транспортних систем [33–35].

Проте для задач напівнатурного моделювання транспортних систем сучасний рівень зрілості когнітивних цифрових двійників поки що є недостатнім. Основними обмеженнями залишаються висока архітектурна складність, недостатня часово-детермінована реалізація для жорсткого real-time та потреба у стандартизованих механізмах інтеграції з HIL-стендами [34, 35].

5. Порівняльна оцінка типів цифрових двійників

Для обґрунтування вибору найбільш придатного типу цифрового двійника для задач напівнатурного моделювання транспортних систем доцільно виконати їх порівняння за сукупністю функціональних і архітектурних критеріїв. До таких критеріїв віднесено характер взаємодії з фізичним об'єктом, можливість роботи в реальному часі, здатність до відтворення динаміки процесів, прогнозування станів, адаптації параметрів моделі, інтелектуального аналізу даних, підтримки прийняття рішень, придатність до інтеграції з HIL-стендом та до застосування для транспортних засобів гусеничного типу. Узагальнені результати якісного порівняння наведено в табл. 1 [12, 15, 19, 24, 29, 34].

Як видно з табл. 1, статичний цифровий двійник є найпростішою формою цифрового представлення об'єкта й може використовуватися переважно як початковий рівень моделювання, але його можливості для HIL-систем є обмеженими через відсутність роботи в реальному часі, адаптації та прогнозування. Динамічний цифровий двійник істотно розширює функціональність за рахунок синхронізації зі стендом та відтворення поведінки системи у часі, однак поступається в аспектах прогнозування та інтелектуальної адаптації. Прогностичний і інтелектуальний цифрові двійники мають значний функціональний потенціал, але окремо не забезпечують повного поєднання властивостей, необхідних для задач HIL-моделювання транспортних систем. Найбільш збалансованим із погляду сукупності критеріїв є інтелектуально-динамічний цифровий двійник, який поєднує детальне динамічне моделювання в реальному часі з можливостями прогнозування, адаптації та інтелектуального формування рішень. Когнітивний цифровий двійник, хоча й має значний потенціал, на сучасному етапі залишається переважно перспективним напрямом через високу архітектурну складність та обмеження щодо забезпечення часової детермінованості в HIL-системах [15, 19, 24, 29, 34, 35].

Таблиця 1 — Порівняння типів цифрових двійників для HIL-моделювання транспортних систем

Критерій оцінювання	Типи цифрових двійників					
	Статичний	Динамічний	Прогностичний	Інтелектуальний	Інтелектуально-динамічний	Когнітивний
Зв'язок із фізичним об'єктом	Односторонній або відсутній	Двосторонній	Двосторонній	Двосторонній або опосередкований	Двосторонній	Багаторівневий, автономний, мережевий
Робота в реальному часі	Ні	Так	Частково	Обмежено	Так	Обмежено для жорсткого real-time

Продовж. табл. 1

Прогнозування станів	Ні	Обмежено	Так	Так	Так	Так
Адаптація / AI-аналітика	Ні	Обмежено	Частково	Так	Так	Високий рівень автономності
Складність реалізації	Низька	Середня / висока	Висока	Висока	Висока	Дуже висока
Придатність для НІЛ-моделювання	Низька	Висока	Середня / висока	Середня	Найвища	Перспективна, але обмежена
Придатність для гусеничних транспортних засобів	Обмежена	Висока	Висока	Середня / висока	Найвища	Перспективна
Основне призначення	Структурний опис об'єкта, цифровий паспорт, конфігураційна основа	Відтворення поведінки системи у часі, тестування режимів, синхронізація зі стендом	Прогнозування майбутніх станів, ресурсу, відмов, сценарний аналіз	Інтелектуальний аналіз, адаптація параметрів, підтримка прийняття рішень	Реальний час, адаптація, прогнозування, інтелектуальне керування	Автономне прийняття рішень, семантична взаємодія, колективна координація

Для переходу від якісного опису до більш формалізованого висновку введемо інтегральну оцінку придатності типу цифрового двійника:

$$S = \sum_{i=1}^n k_i, \quad i=1 \dots n, \quad (1)$$

де S — сумарна оцінка придатності відповідного типу цифрового двійника до задач НІЛ-моделювання;

k — оцінка за i -м критерієм;

n — кількість критеріїв оцінювання.

Оцінювання здійснюється за шкалою від 0 до 3: 0 — властивість відсутня або практично не реалізується; 1 — властивість реалізується обмежено; 2 — властивість реалізується на достатньому рівні; 3 — властивість є вираженою та функціонально значущою перевагою відповідного типу цифрового двійника. Результати бального оцінювання наведено в табл. 2

Таблиця 2 — Оцінка типів цифрових двійників для задач НІЛ-моделювання транспортних систем

Критерій оцінювання	Типи цифрових двійників					
	Статичний	Динамічний	Прогностичний	Інтелектуальний	Інтелектуально-динамічний	Когнітивний
Зв'язок із фізичним об'єктом	0	3	2	2	3	3

Продовж. табл. 2

Робота в реальному часі	0	3	1	1	3	1
Відтворення динаміки процесів	0	3	2	1	3	2
Прогнозування станів і відмов	0	1	3	2	3	3
Адаптація параметрів моделі	0	1	2	3	3	3
Інтелектуальний аналіз даних	0	1	2	3	3	3
Підтримка прийняття рішень	0	1	2	3	3	3
Інтеграції з НІЛ-стендом	1	3	2	2	3	1
Придатність для гусеничних транспортних засобів	1	3	2	2	3	1
Зрілість для практичного використання сьогодні	3	3	2	2	2	1
Сумарна оцінка	5	22	20	21	29	20

Слід зазначити, що наведена бальна оцінка має характер експертно-аналітичного порівняння, заснованого на функціональних можливостях кожного типу цифрового двійника, визначених у результаті аналізу сучасних наукових публікацій та зіставлення їх із вимогами систем напівнатурного моделювання транспортних засобів. Такий підхід не претендує на абсолютну універсальність, однак дозволяє сформулювати обґрунтовану порівняльну основу для вибору архітектури цифрового двійника залежно від класу прикладної задачі. Аналіз результатів, наведених у табл. 2, показує, що найвищу сумарну оцінку у 29 балів отримує інтелектуально-динамічний цифровий двійник. Це пояснюється тим, що саме цей тип поєднує критично важливі для НІЛ-моделювання властивості: двосторонній зв'язок із фізичним об'єктом, роботу в реальному часі, повноцінне відтворення динамічних процесів, адаптацію параметрів моделі, прогнозування технічного стану, інтелектуальний аналіз даних та формування керуючих рішень. Динамічний цифровий двійник також демонструє високий рівень придатності до НІЛ-моделювання завдяки часовій синхронізації та моделюванню поведінки системи у часі, однак поступається інтелектуально-динамічному за критеріями адаптації, прогнозування та підтримки прийняття рішень. Прогностичний та інтелектуальний цифрові двійники мають значний функціональний потенціал, але окремо не забезпечують повного набору властивостей, необхідних для інтеграції із системами НІЛ у задачах транспортного моделювання. Когнітивний цифровий двійник, незважаючи на високий рівень автономності та перспективність, на сучасному етапі розвитку технологій залишається менш придатним до застосування в жорстко синхронізованих НІЛ-системах через високу складність реалізації та обмеження щодо часової детермінованості. Отже, поєднання якісного аналізу, наведеного в табл. 1, із бальною оцінкою за формулою (1) та результатами табл. 2 дає підстави зробити висновок, що інтелектуально-динамічний цифровий двійник є найбільш доцільною архітектурою для задач напівнатурного моделювання транспортних систем, зокрема транспортних засобів гусеничного типу [15, 19, 24, 29, 34, 35].

6. Висновки

У статті розглянуто результати дослідження щодо використання цифрових двійників у системах напівнатурного моделювання транспортних систем та показано, що інтеграція технологій Digital Twin і Hardware-in-the-Loop є перспективним напрямом підвищення точності, інформативності та безпеки випробувань складних технічних об'єктів. За результатами дослідження було удосконалено підхід до класифікації цифрових двійників для задач напівнатурного моделювання транспортних систем шляхом системного виділення шести типів цифрових двійників залежно від рівня функціональності, характеру взаємодії з фізичним об'єктом, здатності до роботи в реальному часі, прогнозування, адаптації та інтелектуальної обробки даних; запропоновано узагальнене структурно-функціональне представлення статичного, динамічного, прогностичного, інтелектуального, інтелектуально-динамічного та когнітивного цифрових двійників у контексті їх інтеграції з системами HIL-моделювання транспортних засобів; набув подальшого розвитку підхід до обґрунтування вибору структури цифрового двійника для HIL-систем за рахунок визначення функціональних переваг інтелектуально-динамічного цифрового двійника як найбільш придатного для задач, що потребують поєднання реального часу, адаптивності, прогнозування та підтримки прийняття рішень.

Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості обґрунтованого вибору структури цифрового двійника при створенні HIL-стендів для транспортних засобів, зокрема гусеничного типу, а також у формуванні методичної основи для подальшої експериментальної верифікації.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на формалізацію системи вагових коефіцієнтів критеріїв оцінювання, розроблення кількісних показників ефективності інтеграції цифрових двійників із HIL-стендами та експериментальну перевірку запропонованого підходу на прикладі транспортних засобів гусеничного типу.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Яковлев Ю.С., Тимашов А.А. Принципы организации и применения полунатурного моделирования. *Математичні машини і системи*. 2019. № 2. С. 80–89.
2. Яковлев Ю.С., Тимашов О.О., Курзанцева Л.І., Єлісєєва О.В. Система напівнатурного моделювання з використанням Smart-технологій. *Математичні машини і системи*. 2020. № 3. С. 106–114. DOI: <https://doi.org/10.34121/1028-9763-2020-3-105-114>.
3. Yan Y., Liu C., Ma X., Zhang Y. Hardware-in-the-loop real-time simulation of electrical vehicle using multi-simulation platform based on data fusion approach. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2019. Vol. 15, N 4. DOI: <https://doi.org/10.1177/1550147719841493>.
4. Shao Y., Mohd Zulkefli M. A., Sun Z., Huang P. Evaluating connected and autonomous vehicles using a hardware-in-the-loop testbed and a living lab. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2019. Vol. 102. P. 121–135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.03.010>.
5. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>.
6. Thelen A., Zhang X., Fink O., Lu Y., Ghosh S., Youn B D., Todd M.D., Mahadevan S., Hu C., Hu Z. A Comprehensive Review of Digital Twin. Part 1: Modeling and Twinning Enabling Technologies. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2208.14197>.
7. Mingotti A., Costa F., Cavaliere D., Peretto L., Tinarelli R. On the Importance of Characterizing Virtual PMUs for Hardware-in-the-Loop and Digital Twin Applications. *Sensors*. 2021. Vol. 21, N 18. Art. 6133. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21186133>.
8. Balan G., Neninger P., Ruiz Zúñiga E., Serea E. A Perspective on Software-in-the-Loop and Hardware-in-the-Loop Within Digital Twin Frameworks for Automotive Lighting Systems. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 15, N 15. Article 8445. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15158445>.

9. Qiu H., Al-Nussairi A.K.J., Chevinli Z.S. et al. Integrating digital twins with neural networks for adaptive control of automotive suspension systems. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 11078. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91243-1>.
10. Park H., Easwaran A., Andalarn S. TiLA: Twin-in-the-Loop Architecture for Cyber-Physical Production Systems. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2003.09370>.
11. Stadtmann F., Wassertheurer H.A.G., Rasheed A. Demonstration of a Standalone, Descriptive, and Predictive Digital Twin of a Floating Offshore Wind Turbine. *ASME 2023 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2023)*. 2023. Vol. 8: Ocean Renewable Energy. New York: ASME, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2023-103112>.
12. Emmert-Streib F. Defining a Digital Twin: A Data Science-Based Unification. *Machine Learning and Knowledge Extraction*. 2023. Vol. 5, N 3. P. 1036–1054. DOI: <https://doi.org/10.3390/make5030054>. URL: <https://www.mdpi.com/2504-4990/5/3/54>.
13. Barbie A., Hasselbring W. From Digital Twins to Digital Twin Prototypes: Concepts, Formalization, and Applications. *arXiv*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2401.07985>.
14. Tekinerdogan B., Verdouw C. Systems Architecture Design Pattern Catalog for Developing Digital Twins. *Sensors*. 2020. Vol. 20, N 18. Article 5103. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20185103>.
15. Algadi A., Uluutku B., Cano J. et al. Digital Twin-Oriented Generation of Structural Data and Models with LiDAR Scan Point Clouds. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43065-025-00140-4>. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s43065-025-00140-4>.
16. A Digital twin modeling and application for gear rack drilling rigs lifting system. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article number: 73954. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73954-z>.
17. Han J., Hong Q., Feng Z., Syed M. H., Burt G. M., Booth C. D. Design and Implementation of a Real-Time Hardware-in-the-Loop Platform for Prototyping and Testing Digital Twins of Distributed Energy Resources. *Energies*. 2022. Vol. 15, N 18. Article 6629. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15186629>.
18. Görtz M. Digital twins: past, present and future. *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. Article 10510. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-026-45272-z>.
19. Van Dinter R., Tekinerdogan B., Catal C. Predictive Maintenance using Digital Twins: A Systematic Literature Review. *Information and Software Technology*. 2022. Vol. 151. Article 107008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107008>.
20. Kapteyn M.G., Pretorius J.V.R., Willcox K.E. A Probabilistic Graphical Model Foundation for Enabling Predictive Digital Twins at Scale. *Nature Computational Science*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43588-021-00069-0>. URL: <https://arxiv.org/abs/2012.05841>.
21. Dai D., Zhao B., Yu Z., Franciosa P., Ceglarek D. Generative and Predictive AI for digital twin systems in manufacturing. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 8. DOI: 10.3389/frai.2025.1655470. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frai.2025.1655470>.
22. Menges D., Stadtmann F., Jordheim H., Rasheed A. Predictive Digital Twin for Condition Monitoring Using Thermal Imaging. *arXiv*. 2024. URL: <https://arxiv.org/abs/2411.05887>.
23. Ai L., Ziehl P. Advances in digital twin technology in industry: A review of applications, challenges, and standardization. *Journal of Intelligent Construction*. 2025. Vol. 3, N 2. Art. 9180083. DOI: <https://doi.org/10.26599/JIC.2025.9180083>.
24. Grieves M. Intelligent Digital Twins and the Development and Management of Complex Systems. *Digital Twin*. 2022. Vol. 1. Article 8. DOI: <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17574.1>.
25. Attaran S., Attaran M., Celik B.G. Digital Twins and Industrial Internet of Things: Uncovering Operational Intelligence in Industry 4.0. *Decision Analytics Journal*. 2024. Vol. 10. Art. 100398. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100398>.
26. Zhang L., Liu J., Zhuang C. Digital Twin Modeling Enabled Machine Tool Intelligence: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2024. Vol. 37. Art. 47. DOI: <https://doi.org/10.1186/s10033-024-01036-2>. URL: <https://link.springer.com/article/10.1186/s10033-024-01036-2>.
27. AI-powered Digital Twin in the Industrial IoT. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110656>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061525002078>.
28. Zhou J. Multi-dimensional Model and Interactive Simulation of Intelligent Construction Based on Digital Twins. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 32189. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-17100-3>. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-17100-3>.

29. Rasheed A., San O., Kvamsdal T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 21980–22012. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>.
30. Digital Twins as Self-Models for Intelligent Structures. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-14347-8>. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-14347-8>.
31. Semantic Agent-Based Intelligent Digital Twins Integrating Demand, Production and Product Through Asset Administration Shells. *Applied System Innovation*. 2026. Vol. 10, N 4. Article 103. URL: <https://www.mdpi.com/2504-2289/10/4/103>.
32. Qiu F., Chen M., Wang L., Ying Y., Tang T. The Architecture Evolution of Intelligent Factory Logistics Digital Twin from Planning, Implement to Operation. *Advances in Mechanical Engineering*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/16878132231198339>.
33. Zheng X., Lu J., Kiritsis D. The emergence of cognitive digital twin: vision, challenges and opportunities. *International Journal of Production Research*. 2022. Vol. 60, N 24. P. 7610–7632. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2014591>.
34. Hribernik K., Cabri G., Mandreoli F., Mentzas G. Autonomous, context-aware, adaptive Digital Twins — State of the art and roadmap. *Computers in Industry*. 2021. Vol. 133. Art. 103508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103508>.
35. Xu L., Mak S., Schoepf S., Ostroumov M., Brintrup A. Multi-agent digital twinning for collaborative logistics: Framework and implementation. *Journal of Industrial Information Integration*. 2025. Vol. 45. Art. 100799. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100799>.

Стаття надійшла до редакції 10.06.2026 / прийнята до друку 13.08.2026