

В.М. Павленко¹
В.М. Павленко²
В.П. Кужель³
В.М. Мануйлов⁴

ІНТЕГРАЦІЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ У СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТРАНСПОРТОМ

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

²Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут"

³Вінницький національний технічний університет

⁴Навчально-науковий інститут професійної освіти при Національній академії Національної гвардії України, м. Харків

Дослідження спрямоване на огляд ключових функцій, необхідних для побудови моделей прогнозного обслуговування, що використовують цифрові двійники (ЦД), з метою слугувати прискорювачем для майбутніх первинних досліджень у цій галузі. Також воно має на меті усунути прогалину щодо ЦД в автомобільній галузі, представивши поточний стан цифрової інтеграції для вантажних, пасажирських та автономних транспортних засобів, а також оцінити їх рівень зрілості за допомогою інструменту оцінки зрілості. Очікується, що результати цього дослідження стануть теоретичною основою для розуміння сучасних тенденцій методів, які використовуються. оскільки прогнозне обслуговування та цифрові двійники швидко розвиваються.

Також в роботі розглядаються питання швидкого зростання обсягу даних цифрових датчиків від машин та доступності використання цих даних через Інтернет речей (IoT), що дозволяє підприємствам приймати рішення на основі даних. Розглядається потенціал цифрового двійника в оцінці реакції фізичної системи на неочікувану подію до її настання. Аналізуються останні тенденції підвищення ефективності на основі ЦД для вантажних, громадських та автономних транспортних засобів. Обговорюються різні типи цифрових двійників (прототип, унікальний, агрегат) залежно від стадії розробки продукту та його ЦД, а також їхній потенціал у контексті транспортних засобів. Розглянуто шість рівнів зрілості ЦД.

Крім того, акцент зроблено на інтеграції цифрових двійників у системи керування транспортом. Також акцентується увага на тому, що цифрові двійники забезпечують представлення фізичної машини в режимі реального часу та генерують дані, які може використовувати алгоритм прогнозного обслуговування. Висвітлюється використання ЦД для різних застосувань, від моніторингу стану акумулятора до забезпечення повністю автономної експлуатації транспортних засобів. Отже цифрові двійники повинні безперешкодно інтегруватися у існуючі системи управління технічним обслуговуванням.

Ключові слова: автомобіль, цифрові двійники, прогнозне обслуговування, Індустрія 4.0, транспорт, прогнозне технічне обслуговування, залишковий термін корисного використання, транспортні засоби, автономні транспортні засоби, машинне навчання.

Постановка проблеми

Однією з ключових проблем створення систем прогнозного обслуговування є відсутність даних про відмови, оскільки машина часто ремонтується до її виходу з ладу. Цифрові двійники забезпечують представлення фізичної машини в режимі реального часу та генерують дані, такі як деградація активів, які може використовувати алгоритм прогнозного обслуговування.

З початку промислової революції технічний та технологічний прогрес різко підвищив промислову продуктивність. Однак після 1970-х років, з тенденцією до автоматизації машин, технологічний прогрес у галузі відставав порівняно з іншими ринками [1]. У 2011 році розпочалася нова революція цифрового розвитку в галузі, також відома як Індустрія 4.0 [2]. Ця трансформація об'єднує датчики, машини та системи інформаційних технологій (ІТ). Ці пов'язані системи, які також називають кіберфізичними системами, можуть взаємодіяти та обмінюватися даними через інтернет-протоколи.

Хоча виробничі процеси та автомобілі стають дедалі розумнішими та складнішими, світові правила викликають потребу в надійніших та безпечніших системах. Наприклад, відмова компонента машини може спричинити подальше пошкодження машини, завдати шкоди працівникам або забруднити навколишнє середовище. Технічне обслуговування виконується для запобігання небезпечним поломкам машин та покращення їхнього стану.

Сучасна література та тенденції розвитку Індустрії 4.0 спрямовані на масове впровадження цифрових двійників. Швидке зростання обсягу даних цифрових датчиків від машин та доступність використання цих даних через Інтернет речей (IoT) дозволяють підприємствам приймати рішення на основі даних [3]. Одна з можливостей цифрового двійника, згідно з [4], полягає в оцінці реакції фізичної системи на неочікувану подію до того, як вона станеться. Це прогнозування може бути зроблено шляхом аналізу події та поточної реакції на попередні прогнози поведінки. Повний екземпляр цифрового двійника може бути створений залежно від зібраних даних та повноти використаних симуляцій.

Прогнозне технічне обслуговування зосереджено на проактивних методах зниження витрат та збільшення часу безвідмовної роботи машин. Прогнозне технічне обслуговування має на меті передбачити, коли компонент або система більше не виконуватиме свою функцію. На основі залишкового терміну корисного використання (RUL) та інших даних про машину підприємства можуть передбачити, коли планувати технічне обслуговування компонента або системи [5].

У роботі [6] було проведено огляд цифрових двійників для прогнозування RUL, зокрема, щодо деградації зубчастих передач. Використовуючи цифровий двійник, вони визначили, що прогнозування RUL встановлюється за допомогою фізичних або керованих даними моделей. У дослідженнях використовувалися тріщини в зубчастих передачах, втома, подряпини на поверхні, поломка зубів та залишкова деформація для фізичних моделей. У дослідженнях використовувалися методи поверхневого навчання або методи глибокого навчання для моделей, керованих даними.

Роботи [2, 7] можна класифікувати як огляди Індустрії 4.0 та таких методів, як управління станом машин або інтелектуальне виробництво. У їхніх оглядах основна увага приділяється кіберфізичним системам, а не системам цифрових двійників. У роботі [8] було надано найбільш споріднене дослідження щодо огляду цифрових двійників для технічного обслуговування. Підсумовуючи, у пов'язаних роботах цифрові двійники або прогнозне технічне обслуговування досліджувалися окремо та часто несистематично.

Оскільки прогнозне обслуговування та цифрові двійники швидко розвиваються, ми розглянемо сучасні тенденції використовуваних методів. Це дослідження має на меті оглянути ключові функції, необхідні для побудови моделей прогнозного обслуговування, що використовують цифрові двійники. Таким чином, це може слугувати прискорювачем для майбутніх первинних досліджень у цій галузі.

Основна частина

Цифрове двійникування транспортних засобів є знаковим застосуванням цифрових двійників, оскільки концепція двійникування сягає корінням у двійникування космічних апаратів NASA. Хоча ЦД в автомобільній промисловості були визнані за їхню здатність підвищувати ефективність проєктування та виробництва, їхній потенціал для покращення експлуатації наземних транспортних засобів ще не повністю вивчений. Більшість існуючих досліджень ЦД з експлуатації транспортних засобів, окрім існуючого корпусу робіт з автономно-керованих транспортних засобів (АКП), зосереджені на електрифікованих легкових автомобілях.

Однак використання та цінність двійникування варіюється залежно від мети, чи то забезпечення економічно ефективних та сталих вантажних перевезень без перебоїв, сталий громадський транспорт, орієнтований на благополуччя пасажирів, чи повністю автономна експлуатація транспортних засобів. У цьому контексті ЦД використовуються для різних застосувань, від моніторингу стану акумулятора в режимі реального часу до забезпечення повністю автономної експлуатації транспортних засобів. Це призводить до різних вимог, складності та зрілості впроваджених рішень ЦД. Застосування інструменту оцінки зрілості ЦД показує, що більшість ЦД досягли 3-го рівня та дозволяють здійснювати моніторинг у режимі реального часу. Крім того, ЦД 5-го рівня вже існують у закритих середовищах, що дозволяє обмежену автономну роботу.

Цифрове двійникування транспортних засобів є культовим застосуванням цифрових двійників, оскільки ідея двійникування сягає корінням програми Apollo NASA, де було побудовано щонайменше два ідентичні космічні апарати, щоб відобразити умови апарата в космосі та забезпечити підтримку рішень під час місії на основі моделювання з використанням двійника апарата на Землі.

Хоча цифрові двійники все ще мають значення в контексті транспортних засобів в аерокосмічній промисловості, їх використання постійно розширюється на нові транспортні засоби. До них належать транспортні засоби для вантажних перевезень та пасажирські перевезення, а також автономні транспортні засоби для різних цілей Індустрії 4.0, обробка контейнерів у портах та автоматично керовані транспортні засоби (AGV) [9].

Ключовим розвитком тут є те, що транспортні засоби стають програмно-керованими об'єктами, що вимагає великої кількості електронних блоків керування (ЕБУ), які взаємодіють через складні бортові мережі. Ця еволюція зумовлена потребою галузі в розробці нових автомобільних функцій, таких як адаптивний круїз-контроль.

Постійне розширення застосувань цифрових двійників на нові типи транспортних засобів має потенціал для обміну та взаємозв'язку цифрових двійників різних типів транспортних засобів та їхнього навколишнього середовища. Однак існує також ризик того, що цифрові двійники різних типів транспортних засобів обиратимуть різні шляхи з точки зору розуміння, функціональності та впровадження цифрових двійників.

В роботі поставлено мету усунути прогалину щодо ЦД в автомобільній галузі, представивши поточний стан цифрового побратимлення (Digital Twin) для трьох типів транспортних засобів: вантажних, пасажирських та автономних транспортних засобів, а також оцінивши їх рівень зрілості за допомогою інструменту оцінки зрілості [10].

Консорціум цифрових двійників визначає ЦД як «віртуальне представлення реальних сутностей та процесів, синхронізованих із заданою частотою та точністю» [11]. Управлінням життєвим циклом продукту, існує три різні типи цифрових двійників залежно від стадії розробки продукту та його цифрового двійника. Три різні типи цифрових двійників представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Типи цифрових двійників та їхній потенціал у контексті транспортних засобів

Тип цифрового двійника	Характеристика та отримане значення
Прототип цифрового двійника (ПЦД)	Прототип цифрового двійника створюється перед складанням фактичного продукту. Він використовується для тестування та перевірки найкращої конфігурації транспортного засобу на основі експлуатаційних даних попередніх поколінь транспортних засобів та їхніх відповідних двійників. Мета полягає в досягненні найефективнішої конфігурації транспортного засобу, мінімізуючи фізичні випробування.
Унікальний цифровий двійник (УЦД)	ПЦД перетворюється на унікальний цифровий двійник (УЦД) для кожного виготовленого транспортного засобу. Він дозволяє здійснювати моніторинг, оптимізацію та часткове дистанційне керування транспортним засобом через двонаправлений обмін даними. Відповідний УЦД розвивається в систему самонавчання шляхом накопичення даних з транспортного засобу та пов'язаних з ним екземплярів, забезпечуючи високий рівень сумісності.
Цифровий двійник агрегату (АЦД)	Різні УЦД потім агрегуються в цифровий двійник (АЦД). Це дозволяє синтезувати дані та знання, отримані з різних УЦД, для оцінки дій та результуючих закономірностей серед інших УЦД. Це також підвищує ефективність кожного майбутнього транспортного засобу та його відповідного УЦД шляхом вивчення минулого досвіду. Крім того, це дозволяє здійснювати багато спільних операцій за участю кількох транспортних засобів, таких як керування колоною.

Прототип цифрового двійника (ПЦД) дозволяє тестувати нові компоненти за різних умов для впровадження покращень конструкції та прогнозування характеристик транспортного засобу. Таким чином, це дозволяє визначити оптимальну конфігурацію.

Після виготовлення транспортного засобу він отримує власний екземпляр цифрового двійника (ЕЦД), який відображає та оптимізує транспортний засіб на основі даних у режимі реального часу. Нарешті, різні ЕЦД утворюють агрегацію цифрових двійників (АЦД), яка дозволяє обмінюватися даними та знаннями, а також здійснювати спільну оптимізацію між кількома транспортними засобами, як у випадку керування автомобілем у колоні.

Чотири фази життєвого циклу продукту, протягом яких продукт оптимізується за допомогою цифрового двійника, та результуючі потенційні підвищення ефективності, що забезпечуються цифровими двійниками, проілюстровано на рис. 1.

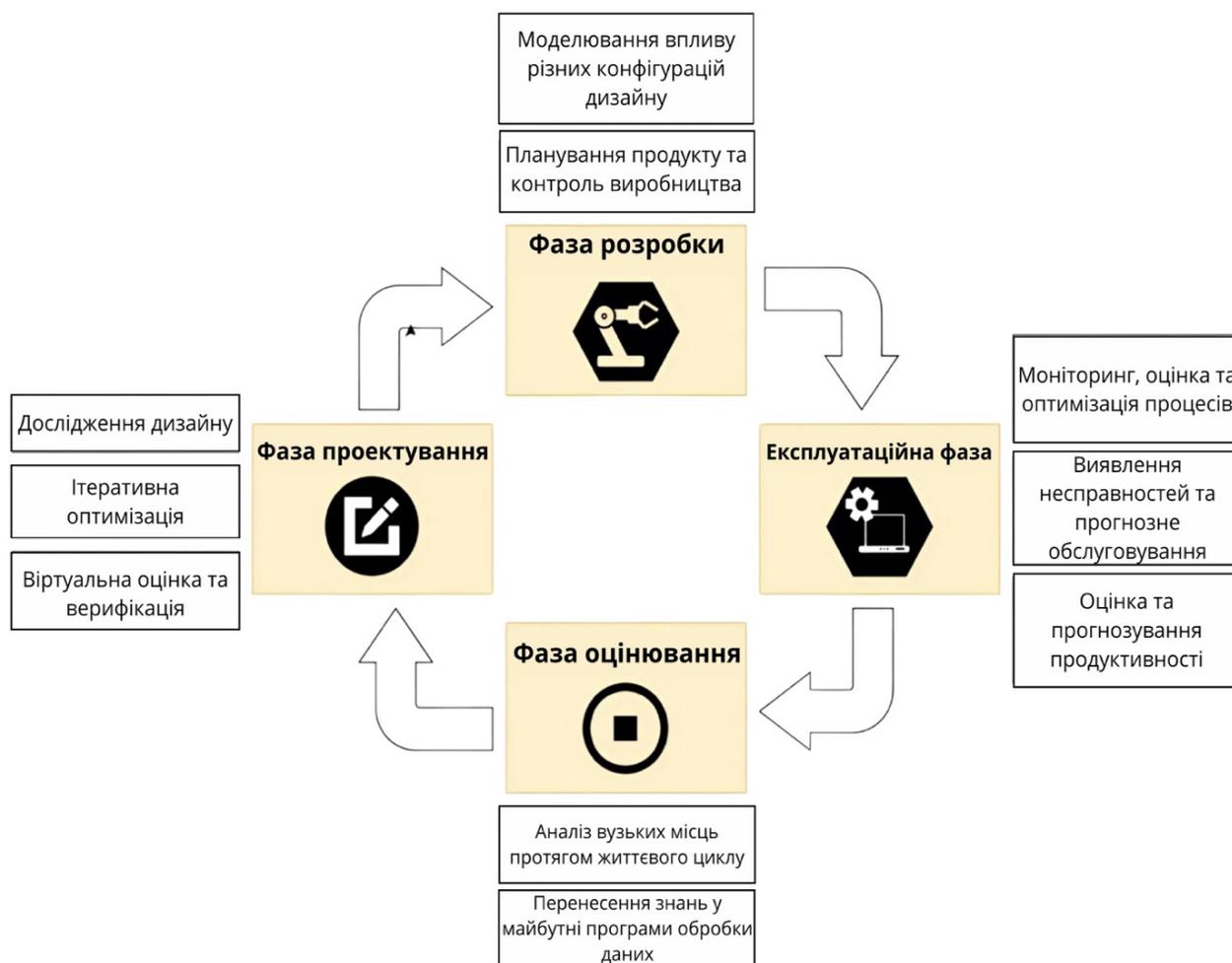


Рис.1. Застосування ЦД протягом усього їхнього життєвого циклу

Таким чином, цифрові двійники впроваджуються для виконання завдань моделювання, пов'язаних з життєвим циклом, замикаючи цикл від операцій та обслуговування назад до фази проектування. У контексті розумних міст, транспорту та логістики вузьке тлумачення цифрових двійників може бути недостатнім. Окрім технологій, ці сфери передбачають активну участь різноманітних спільнот та зацікавлених сторін. Використовуючи аналітику даних, штучний інтелект, машинне навчання Machine Learning (ML) та агентне моделювання, цифрові двійники можуть вирішувати критичні сценарії «що, якщо».

На рис. 2 показано різні компоненти цифрового двійника, включаючи інструменти збору даних, моделювання та підтримки рішень, які дозволяють керувати транспортними засобами на основі цифрового двійника та здійснювати їх експлуатацію.

Описові моделі цифрового двійника сприяють розумінню поточних та минулих подій, тоді як прогнозні моделі дозволяють прогнозувати інформацію, яка ще не була виміряна, що дозволяє приймати рішення та проводити аналіз компромісів.

Нарешті, прескриптивні моделі дозволяють керувати транспортним засобом на основі результатів прогнозних моделей.

Цифрові технології (ЦТ) використовуються в проектуванні та виробництві нових транспортних засобів, а також для вимірювання певних закономірностей та функціональної інформації про транспортний засіб після виготовлення, щоб допомогти в покращенні його продуктивності [12-16]. Таким чином, цифрові двійники вважаються цінним інструментом для оптимізації ефективності та надійності електромобілів, від проектування до економічно ефективної експлуатації.

Цифрові двійники в контексті транспортних засобів стали можливими завдяки постійному розвитку п'яти взаємодоповнюючих технологій: Інтернету речей (IoT), хмарних обчислень, API та відкритих стандартів, штучного інтелекту (ШІ) та технологій цифрової реальності.

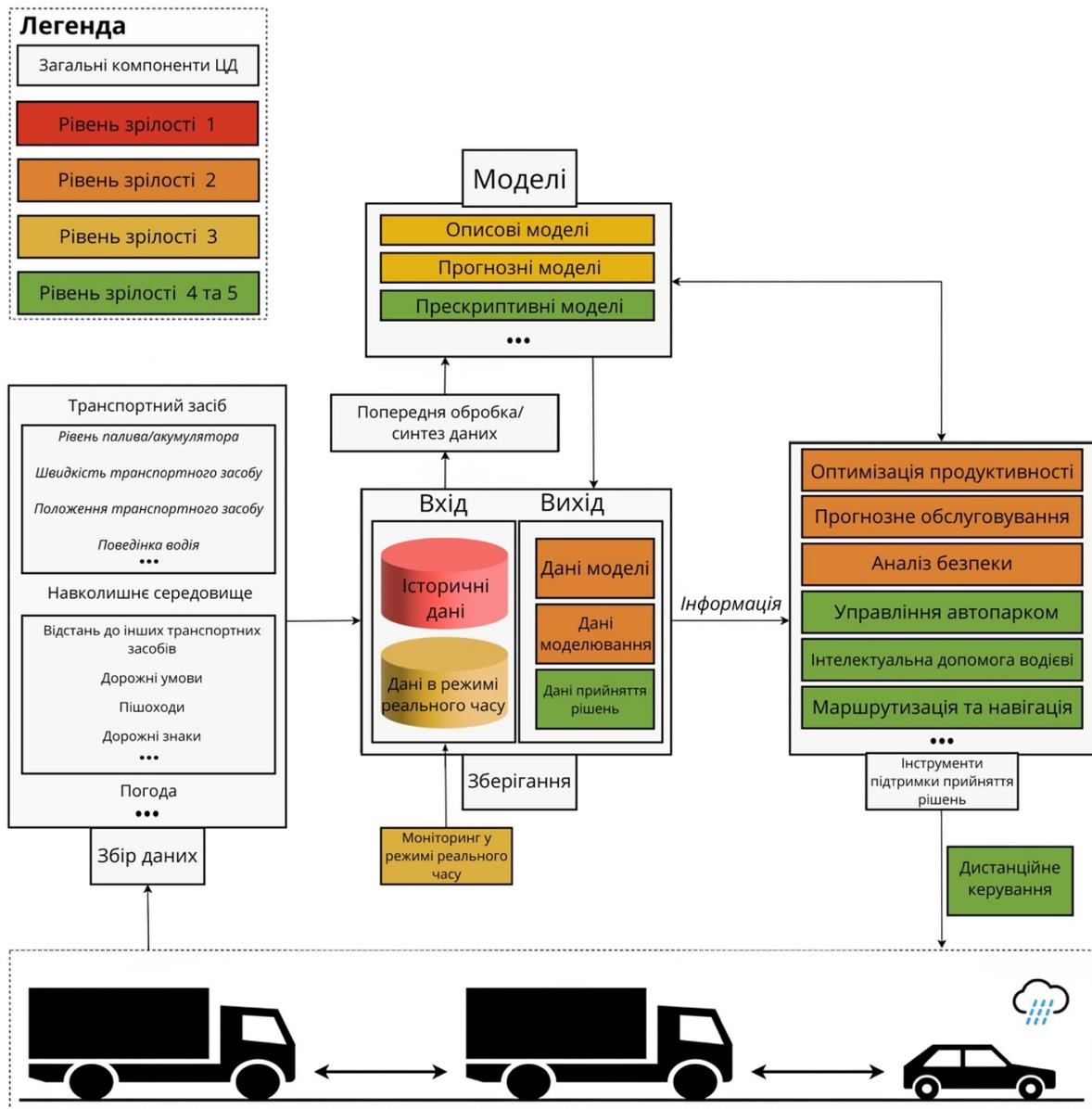


Рис. 2. Застосування рівнів зрілості в контексті ЦД/реальності

Цифрові двійники в контексті транспортних засобів стали можливими завдяки постійному розвитку п'яти взаємодоповнюючих технологій: Інтернету речей (IoT), хмарних обчислень, API та відкритих стандартів, штучного інтелекту (ШІ) та технологій цифрової реальності.

Кількість датчиків та електронних блоків керування в транспортних засобах постійно зростає. Це зростання поєднується з розвитком систем безпеки, включаючи передові системи допомоги водієві (ADAS) та автоматизовані системи керування (ADS). Ці системи вимагають від транспортних засобів усвідомлення навколишнього середовища, прийняття рішень та вжиття заходів, що робить їх ідеальними кандидатами для розгортання ЦТ.

Нещодавні дослідження показують, що цифрові близнюки не повинні діяти ізольовано, а радше постійно спілкуватися, щоб покращити ситуаційну обізнаність поза межами близнюка та полегшити спільне прийняття рішень [10]. У цьому контексті було визначено три типи комунікації навколо цифрових двійників.

Ці канали зв'язку включають двонаправлений зв'язок між цифровим та фізичним двійником, зв'язок між кількома підключеними цифровими двійниками та зв'язок між цифровими двійниками та експертами в предметній області через інтерфейси користувача. Координація цифрових двійників для спільного прийняття рішень має вирішальне значення для різних застосувань, таких як управління автопарком або керування колонами під керівництвом цифрового двійника. Це вимагає сумісності між цифровими двійниками, що визначено як найвищий рівень зрілості.

Цифрові двійники зосереджені на динаміці, навчанні та еволюції, а не просто на цифрових представленнях статичних об'єктів реального світу. Існує шість рівнів зрілості, які охоплюють етап зрілості цифрових двійників, починаючи від набуття фізичних властивостей системи і закінчуючи сумісністю між ними [10]. Ці шість рівнів зрілості адаптовані і їх можна підсумувати наступним чином:

- реплікація активів – дозволяє створити точну репліку транспортного засобу, який буде подвійним. Особливо актуально для розробників версій ПЦД на етапі проектування та розробки;
- зв'язок моделей та систем – дозволяє фіксувати та моделювати вплив реальних подій на основі історичних даних. Це дозволяє тестувати конфігурації на етапі проектування та моделювати різні варіанти розвитку подій на етапі експлуатації. Наступні рівні найбільш актуальні для етапу експлуатації;
- синхронізація даних і процесів – забезпечує виявлення та моделювання впливу змін у режимі реального часу, таких як перебої в русі, шляхом своєчасного відображення даних з фізичного світу в цифровий. Дозволяє користувачеві дистанційно контролювати безпілотний транспортний засіб;
- взаємодія між цифровим двійником та активом – забезпечує двонаправлений обмін інформацією, що дозволяє користувачеві дистанційно видавати команди керування. Дозволяє користувачеві дистанційно керувати безпілотним транспортним засобом;
- автоматизація процесів – дозволяє диспетчеру обробки даних транспортного засобу (ЦТ) приймати автономні рішення щодо експлуатації та технічного обслуговування на основі даних у режимі реального часу та історичних даних, а також своїх моделей. Досягнення цього рівня робить транспортні засоби автономними;
- взаємодія між цифровими двійниками – дозволяє оптимізувати транспортний засіб за межами його фізичних меж шляхом обміну інформацією та знаннями з іншими пов'язаними цифровими двійниками (УЦД). Це дозволяє спільно приймати рішення з УЦД інших транспортних засобів та іншими цифровими двійниками в їхньому середовищі. Це дозволяє повністю реалізувати потенціал цифрових двійників (АЦД).

На рис. 3 показано різні рівні зрілості та їхній ключовий потенціал сприяння, а також наведено зіставлення цих рівнів з конструкціями цифрових двійників цифрової тіні, цифровий двійник та пов'язані цифрові двійники. Це демонструє, що цифрових двійників можна впроваджувати послідовно та розширювати залежно від їхньої відповідної мети.

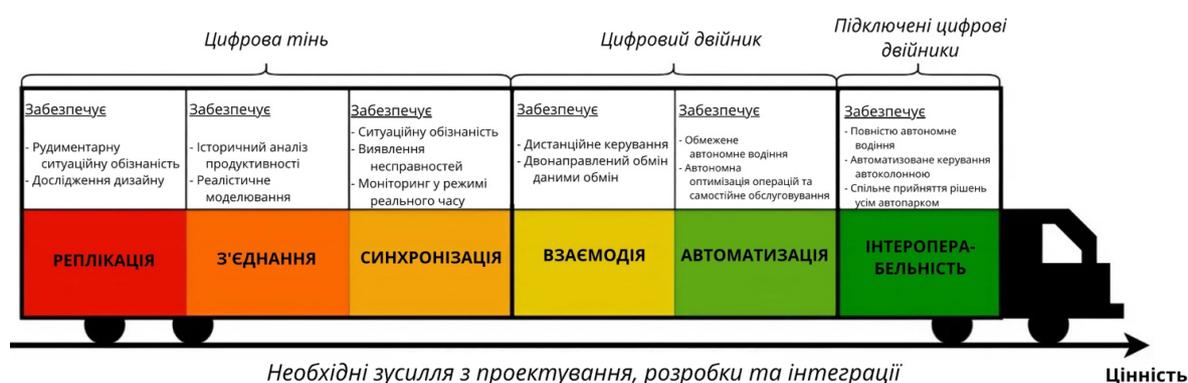


Рис. 3. Рівні зрілості та їхній основний потенціал у контексті транспортних засобів

Цифрові двійники стають дедалі важливішими для різних типів транспортних засобів завдяки їхній здатності підвищувати ефективність та безпеку, а також забезпечувати автономне керування. Огляд застосувань цифрових двійників для пасажирських транспортних засобів, вантажних транспортних засобів та автономних транспортних засобів представлено на рис. 4.

Ці транспортні засоби включають транспортні засоби для громадського транспорту, де комфорт пасажирів є головним пріоритетом; вантажні перевезення, де основна увага приділяється економічно ефективному та екологічно чистому перевезенню товарів, а також автономним транспортним засобам. Нещодавні досягнення в закритих середовищах, таких як порти, склади та видобуток корисних копалин випередили тих, хто працює у відкритому середовищі, такому як громадський транспорт або логістика.

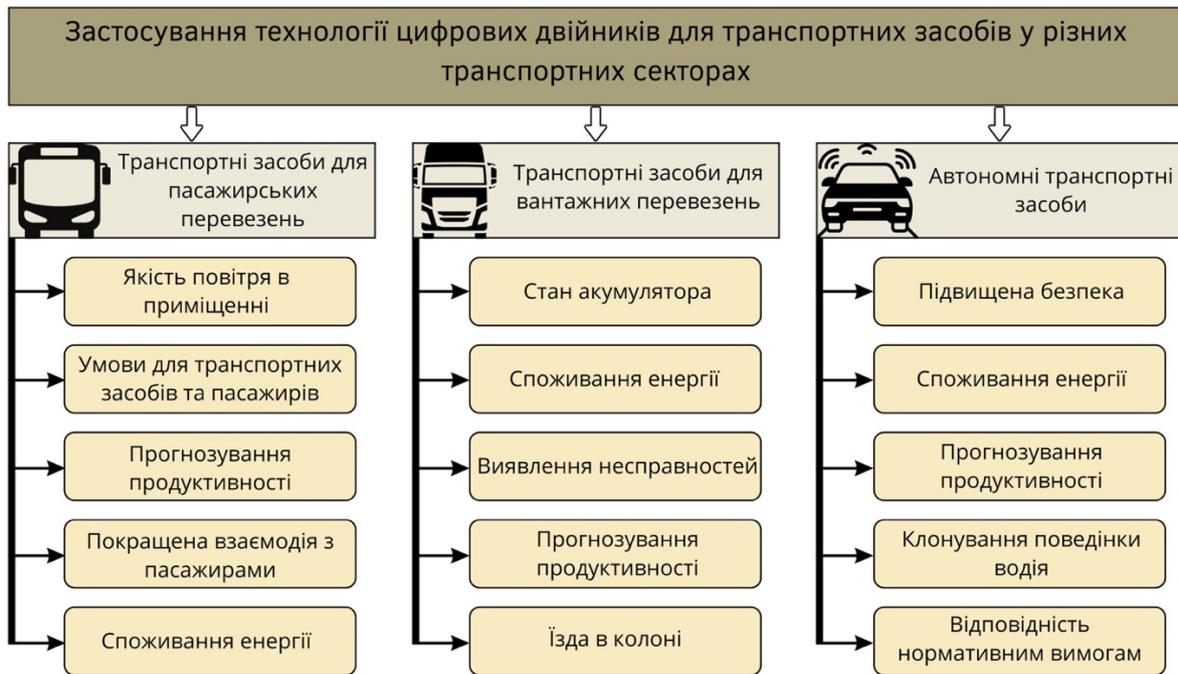


Рис. 4. Застосування цифрових двійників для різних типів транспортних засобів

Впровадження цифрових двійників у прогнозне обслуговування – це стратегічний процес, який вимагає інтеграції даних реального часу, передових інструментів моделювання та моделей машинного навчання у існуючу інфраструктуру обслуговування (рис. 5).

Ось покроковий посібник з успішного впровадження цифрових двійників у виробничих операціях:

1. Збір та інтеграція даних. Першим кроком при інтеграції цифрових двійників є збір даних з усіх відповідних джерел, включаючи датчики, вбудовані в машини, історичні дані з журналів технічного обслуговування та операційні дані в режимі реального часу;



Рис. 5. Впровадження цифрових двійників для технічного обслуговування

2. Створення та калібрування моделі. Після збору даних наступним кроком є створення динамічної віртуальної моделі активу – це «цифровий двійник». Ця модель відтворюватиме поведінку, продуктивність та експлуатаційні параметри фізичного активу в режимі реального часу. Модель необхідно калібрувати з використанням історичних даних про продуктивність, щоб точно відображати поведінку активу;

3. Аналіз даних та розробка прогнозової моделі. За допомогою каліброваного цифрового двійника для аналізу даних застосовуються алгоритми прогнозного обслуговування на основі машинного навчання. Ці моделі прогнозують потенційні збої, виявляючи тенденції та аномалії в продуктивності систем;

4. Інтеграція з існуючими системами технічного обслуговування. Цифрові двійники повинні безперешкодно інтегруватися у існуючі системи управління технічним обслуговуванням. Така інтеграція дозволяє командам технічного обслуговування отримувати корисну аналітику та автоматичні сповіщення на основі прогнозованої аналітики;

5. Постійний моніторинг та постійне вдосконалення. Цифрові двійники розвиваються, постійно збираючи нові дані та оновлюючи свої прогностичні моделі. З кожним оновленням система покращує свою здатність точніше прогнозувати відмови активів, уточнюючи графік технічного обслуговування та забезпечуючи постійну оптимізацію продуктивності.

Висновки

Дослідження, проведене в роботі, доводить, що цифрові двійники створюють віртуальні моделі фізичних активів у режимі реального часу, інтегруючи дані датчиків, історію експлуатації та умови навколишнього середовища для моделювання сценаріїв, прогнозування збоїв та оптимізації графіків технічного обслуговування. Прогнозне обслуговування за допомогою цифрових двійників зменшує час простою та витрати, використовуючи передову аналітику, машинне навчання та симуляції для раннього виявлення аномалій та проактивного втручання. Технологія цифрових двійників революціонує галузь автомобілебудування, дозволяючи проводити високоточне моделювання, безперервний моніторинг у режимі реального часу та складну прогнозну аналітику. Ця інновація поширює свій вплив на всі фази розробки життєвого циклу продукту, від початкової концепції до виведення на ринок. Впровадження цифрових двійників скорочує цикли розробки, зменшує потребу в дорогих фізичних прототипах, вдосконалює виробничі процеси та підтримує перехід галузі до електричних та автономних транспортних засобів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] M. Rüßmann, M. Lorenz, P. Gerbert, M. Waldner, J. Justus, P. Engel, M. Harnisch (2015) Industry 4.0 : the future of productivity and growth in manufacturing industries
- [2] K. Schwab (2017) The fourth industrial revolution, Currency
- [3] K. Shanmugam (2021) The perfect pair: digital twins and predictive maintenance
- [4] B. Schleich, N. Anwer, L. Mathieu, S. Wartzack (2017) Shaping the digital twin for design and production engineering
- [5] P. Papachatzakis, N. Papakostas, G. Chryssolouris, (2007) Condition based operational risk assessment an innovative approach to improve fleet and aircraft operability: maintenance planning
- [6] B. He, L. Liu, D. Zhang (2021) Digital twin-driven remaining useful life prediction for gear performance degradation
- [7] G.Y. Lee, M. Kim, Y.J. Quan, M.S. Kim, H.S. Yoon, S. Min (2018) Machine health management in smart factory: a review
- [8] I. Errandonea, S. Beltran, S. Arrizabalaga, (2020) Digital Twin for maintenance: a literature review
- [9] I. Lichtenstern, F. Kerber (2022) Data-based digital twin of an automated guided vehicle system
- [10] R. Klar, N. Arvidsson, V. Angelakis (2023) Digital twins' maturity: The need for interoperability
- [11] S. Olcott, C. Mullen (2020) Digital twin consortium defines digital twin,
<https://www.digitaltwinconsortium.org/2020/12/digital-twin-consortium-defines-digital-twin/>
- [12] D. Piromalis, A. Kantaros (2022) Digital twins in the automotive industry: The road toward physical-digital convergence
- [13] Volkov, V., Volkova, T., Kuzhel, V., Kyrytsya, I., Vishtak, I. (2025). Intelligent Manufacturing Systems for Controlling the Technical Condition of Vehicles in the Life Cycle. In: Ivanov, V., Silva, F.J.G., Trojanowska, J., Pinto, A.M.G. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing VIII. DSMIE 2025. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95211-1_21
- [14] В. Павленко, В. Павленко, В. Мануйлов, В. Кужель, і А. Буда, «Хмарні рішення для інтеграції та аналізу даних дистанційного моніторингу транспортних засобів», Вісник машинобудування та транспорту, т. 20, вип. 2, с. 109–117. : <https://doi.org/10.63341/vjmet/2.2024.109>
- [15] Information Systems for Vehicles Technical Condition Monitoring / Volodymyr Volkov, Igor Gritsuk, Igor Taran, Tetiana Volkova, Volodymyr Kuzhel, Andriy Semenov, Oleksandr Voznyak // Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, Published 2024, 195, Pages 61-96. Режим доступу: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-54012-7>
- [16] Оперативний контроль технічного стану транспортних засобів : монографія / І.В. Грицук, В.П. Волков, І. В. Худяков, Т.В. Волкова, Кужель В.П. – Харків – Херсон – Вінниця: Едельвейс і К, 2022. – 197 с. ISBN 978-617-7417-00-1

Рекомендована кафедрою автомобілів та транспортного менеджменту

Стаття надійшла до редакції 11.2025

Павленко В'ячеслав Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри інжинірингу систем автомобільного транспорту, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0796-4307>, e-mail: vp.khadi@gmail.com
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків

Павленко Віталій Миколайович, докт. техн. наук, професор, професор кафедри композиційних конструкцій і авіаційного матеріалознавства, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6871-2133>, e-mail: v.pavlenko@khai.edu

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків

Мануйлов Владимир Николаевич, підполковник, начальник відділення підготовки водіїв центру перепідготовки та підвищення кваліфікації, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7306-9138>, e-mail: pchelka2501@gmail.com

Навчально-науковий інститут професійної освіти при Національній академії Національної гвардії України, м. Харків

Кузель Володимир Петрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5646-0274>, e-mail: kuzhel2017@gmail.com

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

V. Pavlenko¹
V. Pavlenko²
V. Kuzhel³
V. Manuylov⁴

Integration of digital twins into transport management systems

¹Kharkiv National Automobile and Highway University

²National aerospace university "Kharkiv aviation institute"

³Vinnitsia National Technical University

⁴ Educational and Scientific Institute of Vocational Education at the National Academy of the National Guard of Ukraine

The study aims to review the key functions required to build predictive maintenance models using digital twins (DTs) in order to serve as a catalyst for future primary research in this field. It also aims to fill the gap regarding DD in the automotive industry by presenting the current state of digital integration for freight, passenger, and autonomous vehicles, as well as assessing their maturity level using a maturity assessment tool. The results of this study are expected to provide a theoretical basis for understanding current trends in the methods used, as predictive maintenance and digital twins are rapidly evolving.

The paper also addresses the rapid growth in the volume of digital sensor data from machines and the availability of this data through the Internet of Things (IoT), which enables companies to make data-driven decisions. The potential of digital twins in assessing the response of a physical system to an unexpected event before it occurs is explored. It analyzes the latest trends in improving efficiency based on DD for freight, public, and autonomous vehicles. It discusses different types of digital twins (prototype, unique, aggregate) depending on the stage of product development and its DD, as well as their potential in the context of vehicles. Six levels of DD maturity are considered.

In addition, emphasis is placed on the integration of digital twins into transport management systems. Attention is also drawn to the fact that digital twins provide a real-time representation of the physical machine and generate data that can be used by a predictive maintenance algorithm. The use of digital twins for various applications is highlighted, from battery condition monitoring to ensuring fully autonomous vehicle operation.

A practical approach involves the implementation of digital twins in predictive maintenance, which is a strategic process that requires the integration of real-time data, advanced modeling tools, and machine learning models. This approach includes: data collection and integration, model creation and calibration, data analysis and predictive model development, integration with existing maintenance systems, and continuous monitoring and improvement.

The conclusions of the study confirm that digital twins create real-time virtual models of physical assets for scenario modeling, failure prediction, and maintenance schedule optimization. Predictive maintenance using digital twins reduces downtime and costs. Digital twin technology is revolutionizing the automotive industry by providing high-precision modeling, continuous monitoring, and sophisticated predictive analytics that impact all phases of the product lifecycle. The implementation of digital twins shortens development cycles, reduces the need for expensive physical prototypes, and supports the industry's transition to electric and autonomous vehicles.

Keywords: automotive, digital twins, predictive maintenance, Industry 4.0, transportation, predictive maintenance, remaining useful life, vehicles, autonomous vehicles, machine learning.

Pavlenko Viacheslav, Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Road Transport Systems Engineering department, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0796-4307>, e-mail: vp.khadi@gmail.com

Pavlenko Vitaliy, D.Sc. (Eng.), Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Composite structures and aviation materials, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6871-2133>, e-mail: v.pavlenko@khai.edu

Kuzhel Volodymyr, Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Automobiles and transport management department, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5646-0274>, e-mail: kuzhel2017@gmail.com,

Manuylov Volodymyr, Lieutenant-colonel, Senior lecturer, Department of command and staff training, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7306-9138>, e-mail: pchelka2501@gmail.com