

DOI: 10.20535/kpissn.2025.3.337306

УДК 004.942:681.5

О.М. Пупена^{1*}, О.М. Клименко², В.В. Полупан²¹ КПП ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна² Національний університет харчових технологій, Київ, Україна,

*corresponding author: pupena_san@ukr.net

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ КЛЮЧОВИХ СТАНДАРТІВ ДЛЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ
У ПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Проблематика. Для розвитку і масштабування цифрових двійників (ЦД) потрібні уніфіковані інструменти, підходи і передусім понятійний апарат. Розроблені нині стандарти з цієї тематики є достатньо новими, тому їх зміст не завжди легко зрозуміти.

Мета дослідження. Метою роботи є отримання відповідей на питання щодо того, які стандарти безпосередньо стосуються ЦД у галузі виробництва, їх призначення, змісту і застосування і можливості їх сумісного використання.

Методика реалізації. Для досягнення поставленої мети було проаналізовано публічно доступні наукові статті, що репрезентують позиції різних наукових шкіл. Основну увагу було приділено роботам, у яких висвітлювалися питання уніфікації та стандартизації ЦД. Проведено огляд і систематизацію основних положень щодо існуючих стандартів, виконано класифікацію ключових термінів і структурних елементів, а також визначено сферу застосування кожного зі стандартів у контексті промислових ЦД.

Результати дослідження. У процесі дослідження було здійснено комплексний аналіз ключових міжнародних стандартів, присвячених ЦД, зокрема ISO/IEC 30173:2023, ISO 23247:2021 (усі чотири частини), IEC 63278-1:2023, ISO/IEC TR 30172:2023 та ISO/TR 24464:2025. Зроблено порівняння основної термінології стосовно ЦД, цільової сутності та їх зв'язку; структурних представлень ЦД; концепцій життєвих циклів ЦД; галузь використання ЦД; зв'язок з іншими стандартами та можливість сумісного застосування.

Висновки. Хоча формально між стандартами ISO/IEC 30173, ISO 23247 та IEC 63278 немає явних суперечностей, проведений аналіз їхніх підходів до побудови каркасів ЦД виявив принципові відмінності в понятійному апараті, структурі ЦД, вказаних у базових стандартах, на які вони посилаються. Це дозволяє зробити висновок, що їхнє одночасне використання в межах єдиного життєвого циклу ЦД неможливе без впровадження додаткового адаптаційного шару, який забезпечував би їхню сумісність.

Ключові слова: цифровий двійник; цільова сутність; стандарти цифрових двійників; життєвий цикл; IoT.

Вступ

Відтоді, як ЦД вперше запропонував на початку 2000-х років Майкл Грівз [1] під час презентації курсу з управління життєвим циклом продукції, вже пройшло більше двадцяти років, однак тільки останнім часом ця тема стала однією з найбільш динамічних у промисловому секторі. На початку другого десятиріччя XXI століття, реалізація ЦД вважалась складною процедурою, що вимагала значного розвитку різних технологій та значних ресурсів. Перші впровад-

ження зробили NASA для моделювання умов у космосі та проведення випробувань для підготовки польотів, пізніше вона почала поширюватися на обслуговування літаків і на виробничу сферу. З розвитком технологій, що стали основою Індустрії 4.0, зокрема промислового Інтернету речей, машинного навчання, штучного інтелекту та хмарних обчислень, концепція отримала весь необхідний стек для реалізації.

Водночас, як і будь-яка технологія, що динамічно розвивається, ЦД часто використовують як чергову гарну назву, яка добре продається-

Пропозиція для цитування цієї статті: О.М. Пупена, О.М. Клименко, В.В. Полупан, «Систематизація ключових стандартів для цифрових двійників у промисловому виробництві», Наукові вісті КПП, № 3, с. 60–73, 2025. doi: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.337306>

Offer a citation for this article: O.M. Pupena, O.M. Klymenko, V.V. Polupan, “Systematization of key standards for digital twins in industrial manufacturing”, KPI Science News, no. 3, pp. 60–73, 2025. <https://doi.org/10.20535/kpissn.2025.3.337306>

ся. І як з Індустрією 4.0/5.0, ажіотаж навколо ЦД створює додатковий бар'єр для його сприйняття технічними спеціалістами та бізнесом.

Нині ЦД називають моделі, 3D-візуалізацію, навіть системи диспетчеризації. Навіть серед спеціалістів, що вже мають досвід впровадження ЦД, часто немає єдиного бачення, що взагалі можна назвати цифровим двійником. Те саме стосується науковців, особливо з різних наукових шкіл та галузей/підгалузей знань. Це своєю чергою зумовлено тим, що як і моделювання, ЦД можуть віддзеркалювати будь-що, в чому є потреба, для зовсім різних цілей. Наприклад, так само як модель турбіни літака в динаміці відрізняється від 3D-моделі приміщення в статистиці, ЦД турбіни та будівлі будуть зовсім інші і використовуватимуться для зовсім різних задач. Водночас сама концепція залишається єдиною, а отже найбільш загальні кращі практики можна переносити і масштабувати. Для розвитку і масштабування потрібні уніфіковані інструменти, підходи і передусім понятійний апарат. Для цього у світі використовуються стандарти, які закріплюють кращі практики і дають можливість діяти злагоджено.

Таким чином, під час використання конкретних практик, а тим більше стандартів, питання означення ЦД та інших його базових складових не потребуватиме трактувань. Наявність стандартизованих підходів у сфері ЦД забезпечить методологічну єдність у визначенні термінології, структурних компонентів та функціональних можливостей ЦД у міждисциплінарному середовищі. Впровадження стандартів сприяє досягненню сумісності між системами різних виробників, полегшує інтеграцію даних, моделей і сервісів, а також забезпечує інтероперабельність міжгалузевих рішень. Крім того, стандартизація створює передумови для підвищення довіри до ЦД через формалізацію вимог до їхньої достовірності, відтворюваності та відповідності фізичним об'єктам. Таким чином стандарти є інструментом, що підтримує масштабованість, повторне використання та розвиток екосистем ЦД у різних галузях промисловості. Тому, починаючи з 2018 року, міжнародні організації зі стандартизації, зокрема ISO, IEC, IEEE та ITU, ініціювали розроблення відповідних стандартів і технічних звітів, серед яких одними з перших стали серії ISO 23247, ISO/IEC 30173, IEC 62832 та інші. Ці документи формують основу для системного впровадження ЦД.

Як описано нижче, самі стандарти не гармонізовані, навіть у галузі єдиного сегменту,

наприклад виробництва. Поява кількох стандартів від різних комітетів вносить плутанину та незрозумілість щодо їх застосування. Самі стандарти потребують додаткового тлумачення та путівника щодо їх використання.

Постановка задачі

Це дослідження призначене для отримання відповідей на такі запитання:

- які стандарти безпосередньо стосуються ЦД в галузі виробництва?

- які призначення, зміст і застосування розглянутих стандартів?

- які найбільш загальні і спільні концепції використовуються для всіх стандартів і їх сумісне використання?

Методи дослідження

1. Огляд літератури

Нині ЦД є однією з головних тем для дослідників, що свідчить про безсумнівну потребу ринку в їх запровадженні. Велику кількість статей можна знайти у відкритому доступі. Однак наше дослідження стосується саме стандартів для ЦД, тому розглянемо лише ті статті, в яких було описано тему уніфікації та стандартизації, які наразі є у публічному доступі та які подані різними науковими школами, зокрема США [2], [3], Китаю [4], Італії [5], Південної Кореї [6] та Великобританії [7].

Основну увагу було приділено оглядам, які передували появі перших стандартів. Фундаментальною оглядовою статтею в темі є робота [5], в якій автори аналізували визначення ЦД, які мають бути його основні характеристики і галузі застосування. Вони класифікували концепцію та означення за більш ніж сімдесятьма джерелами, за галуззю застосування (найбільше — виробництво), за роком публікацій, а також визначили основні характеристики ЦД, які наведено в наукових джерелах. Крім цього, автори проаналізували зафіксовані випадки застосування у трьох основних галузях — виробництво, авіація та охорона здоров'я. Окремо було наголошено на цінності використання ЦД для колаборативного проектування, коли у процесі створення продукту залучено кілька предметних експертів, що потребує стандартизації та уніфікації. Розглянули можливості та проблеми використання ЦД у контексті життєвих циклів.

У 2021 році після публікації ISO 23247, з'явилися статті, які ґрунтуються на цій серії стандартів. Однак низка авторів відмічають розбіжності між наявними стандартами та роботою різних комітетів. Так у статті [4] розглянуто проблему відсутності єдиної термінології та стандартизованих підходів до ЦД, що ускладнює їхню взаємодію між різними підприємствами й галузями. Автори обґрунтовують необхідність стандартизації як ключового чинника, для ефективного впровадження цієї міждисциплінарної технології. Для цього було проведено дослідження щодо наявних стандартів і каркасів, які стосуються впровадження ЦД, зокрема в таких ключових аспектах, як технічна архітектура, приклади застосування та виклики. Як відправну точку вони використали п'ятивимірну архітектуру, запропоновану в роботі своїх колег: фізичну сутність, віртуальну сутність, дані ЦД, з'єднання та сервіси. Для кожного з вимірів автори виділили конкретні потреби в майбутній стандартизації, а також зробили мапу стандартів, яку назвали каркасом (framework) стандартів для ЦД. Водночас автори зауважили, що є проблема з узгодженістю наявних стандартів для самого означення ЦД, зокрема самого терміну «цифровий двійник».

Враховуючи різні органи стандартизації, такі як ISO, IEC, ITU-T, IEEE-SA, що часто зосереджуються на певних галузях застосування ЦД, відрізняється не тільки концепція, а й означення самого ЦД, що є викликом для сумісності та інтероперабельності. Тому автори зазначають важливість, майбутнього на той час, спільного стандарту ISO/IEC 30173 [8] як єдиного фундаментального. Водночас автори зазначають позитивною рисою те, що стандарти випереджають масове впровадження ЦД, що може прискорити їх розвиток. Фактично багато стандартів вже є, їх необхідно узгоджувати в межах використання ЦД.

У [7] дослідники також зауважують, що стандарти тільки з'являються і дуже залежать від сфери застосування ЦД. Вони також систематизували поняття ЦД, означення ЦД та їх структури, порівняли ЦД з іншими технологіями та концепціями. З огляду на те, що ЦД використовується в багатьох сферах і залежить від інших еволюційних технологій, на його реалізацію дуже впливають поточний стан цих технологій і потреба адаптації до кожної конкретної задачі та предметної області.

Відсутність усталених єдиних стандартів стримує широке впровадження, масштабування і повномасштабну реалізацію цієї технології. Ав-

тори зробили зріз наявних стандартів для ЦД. Серед основних викликів впровадження автори виділяють синхронізацію з високою точністю, сумісність з наявним програмним забезпеченням, яке використовується у виробничому циклі, питання кібербезпеки, безпеки IoT та безпеки міжгалузевої взаємодії, додаткові витрати на ресурси, час і дослідження ЦД.

У статті [3] автори проаналізували серію стандартів ISO 23247 та оцінили можливість їх застосування у нових галузях промисловості та новітніх виробничих технологіях на прикладі адитивного виробництва. Ця оглядова стаття містить досить детальний опис чотирьох наявних частин серії та майбутніх частин.

У статті [2] автори також зазначають, що у зв'язку з індивідуальними підходами до створюваних нині ЦД, є гостра потреба в стандартизації, зокрема інтероперабельності для можливості інтеграції зі старими системами та ЦД між собою, онтологій каркасу ЦД, а також для тестування ЦД. Автори зауважують, що наявність кількох каркасів, зокрема стандартизованих, які відрізняються як загальною структурою, так і кількістю компонентів, ускладнює процеси вибору та наступної інтеграції рішень. Крім того, екосистема ЦД наразі не сформована, а більшість рішень є індивідуальними, що унеможлиблює повторне використання і є дорогим та тривалим процесом. Задачу здебільшого вирішують локально, а не комплексно, самі ж ЦД використовують тільки на певних етапах життєвого циклу. Останнє ускладнює передачу даних по життєвому циклу двійника, що заважає створенню «цифрової нитки», а отже усіх переваг від впровадження ЦД.

У своєму дослідженні автори виділили основні класи ЦД (описові, діагностичні, прогностичні, приписувальні та інтелектуальні), що фактично відповідає типам аналітичних сервісів. У роботі наведено основні рамкові стандарти щодо ЦД, а також додаткові, які можуть використовуватися для конкретних аспектів ЦД. У статті на конкретному прикладі показано процес розроблення ЦД з використанням стандартів на основі каркасу ISO 23247, а також майбутні напрями досліджень для стандартизації – цифрова нитка, композиція ЦД, онтології для каркасу ЦД, створення ЦД з повторно використовуваних компонентів, оцінювання достовірності ЦД, ЦД та метавсесвіт (VR, AR, MR).

Хоч у дослідженні [6] автори здебільшого зосереджувалися на інтеграції ШІ з ЦД, вони

окремо розглянули фундаментальні основи ЦД та стандарти, що дає змогу краще їх зрозуміти. Вони зібрали сімдесят означень ЦД з різних джерел, виділили сім різних архітектур, категорій ЦД. Класифікація понять ЦД проводилася з погляду застосування, ієрархії та моделювання. Як і їх колеги, автори наголошують на важливості стандартів.

Отже, можна сказати, що наукова спільнота визнає критичну важливість стандартизації як ключового чинника для реалізації повноцінних екосистем ЦД і переходу від локальних рішень до системного міждисциплінарного впровадження.

2. Актуальність проблеми

У деяких з наведених статей вдало описано серію стандартів ISO 23247, що значно спрощує його імплементацію. Однак нам поки що не траплялися статті з оцінкою стандарту ISO/IEC 30173, оскільки його було опубліковано у 2023 році. Додатково в роботах згадується використання Asset Administration Shell з концепції RAMI 4.0, однак з аналізу самого стандарту, застосованого для ЦД, статті не траплялися. Враховуючи зосередженість цього дослідження виключно на виробничій сфері, станом на момент написання статті, можна виділити такі стандарти, що стосуються рамок концепцій ЦД:

- ISO 23247:2021 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing;
- ISO/IEC 30173:2023 – Digital twin – Concepts and terminology;
- IEC 63278-1:2023 – Asset Administration Shell for industrial applications – Part 1: Asset Administration Shell structure;
- IPC-2551, International Standard for Digital Twins.

Також ми ознайомилися з текстами усіх наведених стандартів, окрім IPC-2551. Окрім того, додатково було проаналізовано текст таких технічних звітів:

- ISO/IEC TR 30172:2023 – Internet of things (IoT) – Digital twin – Use cases;
- ISO TR 24464:2025 – Visualization elements of digital twin – Visualization fidelity.

Серед усіх наведених стандартів тільки над ISO 23247 було виконано досить ґрунтовну роботу. Водночас інші стандарти фактично не розглянуті. Крім того, нам не траплялися порівняння стандартів між собою та поради щодо їх

застосування. Тому дослідження питань їх змісту та порівняння є актуальними.

Таким чином актуальним залишається комплексний аналіз наведених вище ключових міжнародних стандартів, присвячених ЦД, щодо термінології, структури ЦД, життєвих циклів ЦД, і галузь використання цих стандартів та сумісного застосування під час розроблення систем з використанням ЦД.

У наступних частинах цієї статті здійснено систематизацію щодо цих стандартів, зокрема виділено та проведено порівняння основних термінів і конструкцій, а також визначено застосовність стандартів і можливість їх сумісного використання.

3. Зміст рамок стандартів технічних звітів стосовно цифрових двійників для виробництва

ISO/IEC 30173:2023 Digital twin – Concepts and terminology [8]

Призначення стандарту ISO/IEC 30173 – встановити термінологію для ЦД (DTw) і описати концепції в цій області функціональне представлення та зацікавлені сторони ЦД. Це своєю чергою має стати основою для інших стандартів і зрозумілішої комунікації між різними зацікавленими сторонами. Також у стандарті наведено перелік переваг та вигод від впровадження ЦД. Варто зауважити, що хоч цей стандарт є найбільш фундаментальним, він був опублікований пізніше за ISO 23247, хоч той має більш прикладний характер.

У стандарті об'єкт, для якого створюється ЦД, означається як цільова сутність (target entity) – це щось існуюче і відокремлене, що виконує певну функцію в реальному світі та є об'єктом цифрового представлення. Цільова сутність може бути як фізичною (сутність у фізичному світі, яка може бути об'єктом вимірювання або впливу), так і цифровою (обчислювальна сутність, що складається з елементів даних і процедурних елементів). Цифровий двійник – це цифрове представлення цієї цільової сутності разом з каналами передачі даних, які забезпечують узгодження фізичного й цифрового станів із відповідною швидкістю синхронізації. Цифровий двійник може забезпечувати інтегроване уявлення протягом усього життєвого циклу цільової сутності.

Також у стандарті означене поняття системи ЦД – це гібридна сутність або система систем, що складається з цільових сутностей, цифрових сутностей, з'єднання даних між ними, а також моделей, даних та інтерфейсів, задіяних

у процесі передавання даних. Система ЦД містить щонайменше одну цільову сутність і її цифрову сутність, які синхронізуються і взаємодіють із зацікавленими сторонами для покращення одного або кількох показників ефективності цільової сутності на одному або кількох етапах її життєвого циклу. Цифрова сутність у цій системі — це поєднання обчислювальних або інформаційних компонентів, створених цифровими технологіями на основі характеристик цільової сутності. Цільова сутність має надавати дані моделювання й оперативні дані, в режимі наближеному до реального часу, цифровій сутності, яка, у свою чергу, повертає результати аналізу, що забезпечує таким чином взаємне підсилення.

Для більш фундаментального означення у стандарті для встановлення осмисленого зв'язку між фізичними явищами, їх цифровими представленнями та значеннями використовується принцип семіотики. Він дає змогу описати, як спостережувані дані (феномени) через певні символи (наприклад, сигнали, мітки, ідентифікатори) отримують інтерпретацію в цифровому середовищі, формуючи семантичні конструкції, придатні для аналізу та автоматизованого прийняття рішень. Це дозволяє ЦД ухвалювати рішення в реальному часі, навіть за умов часткової невизначеності, й адаптувати свою поведінку або вплив на фізичну систему відповідно до інтерпретованої ситуації.

Для розуміння місця ЦД серед інших споріднених концепцій у стандарті наведено порівняння ЦД з імітаційним моделюванням, кіберфізичними системами та Інтернетом речей. Це порівняння дозволяє окреслити відмінності та взаємозв'язки між цими підходами. Зокрема, на відміну від традиційного імітаційного моделювання, яке зазвичай працює поза реальним об'єктом, ЦД має постійний зв'язок із фізичною сутністю та функціонує в режимі двосторонньої синхронізації. У контексті кіберфізичних систем ЦД розглядається як модельна складова, яка забезпечує відображення стану об'єкта, тоді як кіберфізична система охоплює повну реалізацію взаємодії між фізичним і цифровим рівнями. Інтернет речей, у свою чергу, є базовою інфраструктурою для збору та передавання даних, необхідних для функціонування ЦД, забезпечуючи основу для їхньої інтерактивності та оперативності.

Цілий розділ присвячений контексту системи ЦД, в якому описано ключові компоненти, функції та взаємозв'язки, що забезпечують його роботу в межах ширшої інформаційної екосистеми. У цьому контексті ЦД розглядається

не ізольовано, а як гібридна система, що поєднує фізичну сутність (цільовий об'єкт або процес), цифрову сутність (модель або символічне представлення), засоби передачі даних між ними, а також інтерфейси і ресурси, які забезпечують їхню взаємодію.

Згідно зі стандартом ISO/IEC 30173, процес життєвого циклу ЦД описує етапи розвитку як самої цифрової сутності, так і пов'язаної з нею цільової сутності. Ці два життєві цикли мають подібну структуру, але не завжди збігаються за часовими віхами. На етапі спільного існування цифрова та цільова сутності перебувають у постійному зв'язку із заданою частотою синхронізації. Зміни, що виникають у цифровій сутності на етапах експлуатації, аналізу або повторного оцінювання, можуть бути ітеративно повернені до фази проєктування, що дозволяє вдосконалювати моделі або функціональні можливості. Такий підхід відображає гнучкість ЦД як інструмента для адаптивного управління системами протягом усього їх життєвого циклу.

Згідно зі стандартом виділяються різні типи ЦД залежно від охоплення цільової сутності: компонента, активу, системи або процесу. Цифровий двійник компонента — це зазвичай ключовий елемент, що суттєво впливає на ефективність цільової сутності, до якої він належить. Наприклад це може бути насос всередині системи, для якого треба окремо створити ЦД. Цифровий двійник активу, який може охоплювати кілька компонентів ЦД, забезпечує огляд на рівні одиниці устаткування. Цифровий двійник системи розробляється для сутностей, які спільно реалізують системну або мережну функцію, що дає змогу бачити взаємодію пов'язаних або взаємозалежних сутностей. Цифровий двійник процесу надає уявлення про сукупність дій або операцій, і може містити фізичні сутності або ЦД систем, але головну увагу зосереджено саме на процесі, а не на фізичних об'єктах. Таке розділення дозволяє створювати багаторівневі ЦД, адаптовані до конкретних потреб на різному рівні ієрархії керування.

У стандарті також означено ключові зацікавлені сторони системи ЦД, які беруть участь у її створенні, підтримці та використанні. Вони поділяються на дві основні категорії: учасники системи ЦД та партнери екосистеми. Такий поділ ролей дозволяє структурувати відповідальність і взаємодію у складних проєктах ЦД, сприяючи їх ефективному розвитку і впровадженню.

ISO 23247 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing

Досить детально усі частини серії ISO 23247 описані в [3]. Тут виділимо тільки найважливіше. Тоді як ISO/IEC 30173 є універсальним стандартом для означення концепції та термінології, серія міжнародних стандартів ISO 23247 становить фундаментальну основу (каркас) для розробки та впровадження ЦД саме у сфері виробництва. Ці документи стандартизують підхід до створення, інтеграції та керування ЦД спостережуваних виробничих елементів (observable manufacturing elements, OME) на виробництві.

Перша частина ISO 23247-1 [9] формує загальний каркас для створення ЦД у виробництві, означуючи базові терміни, концепції та ключові принципи, на яких ґрунтується подальша деталізація в наступних частинах серії. Документ наводить переваги та описує основні функції ЦД, серед яких віртуалізація спостережуваних виробничих елементів, забезпечення двостороннього зв'язку між фізичним і цифровим середовищем, а також підтримка прийняття рішень на основі даних. Цифрові двійники класифіковано за типами спостережуваних об'єктів – персонал, об-

ладнання, матеріали, процеси, інфраструктура, довкілля, продукція й супровідна документація. У додатку А ISO 23247-1 показано застосування ЦД протягом життєвого циклу продукції, зокрема розглянуто відношення між виробничими ЦД та системними ЦД, а також поняття керованого і керуючого двійника, відповідно до фактичного та планового подання виробничих процесів. Такий розподіл дозволяє інтегрувати ЦД виробництва у ширший контекст цифрової нитки (digital thread) і забезпечити повне відслідковування та зворотний зв'язок між стадіями розробки, виробництва та експлуатації.

Запропонований у стандарті каркас у свою чергу ґрунтується на каркасі Інтернету речей (IoT), затвердженого в стандарті ISO/IEC 30141. У другій частині [10] подано референтну архітектуру ЦД у контексті відображення на каркас IoT. У табл. 1 показано відображення у контексті моделі сутностей (Entity).

У третій частині стандарту [11] подано довідкову інформацію щодо того, які типи інформаційних атрибутів слід моделювати для забезпечення адекватної цифрової репрезентації елементів виробничого середовища. У цій ча-

Таблиця 1. Відображення сутностей ISO/IEC 30141 на ISO 23247

Сутність ISO 23247	Аналогічна сутність ISO/IEC 30141	Функціональне призначення
Observable Manufacturing Resources не є частиною каркасу, але об'єкт впливу	Physical Entity (PE) є частиною IoT системи	Фізичні ресурси (обладнання, персонал, середовище, матеріали), які є об'єктами моделювання і спостереження
Device Communication Entity: Data collection sub-entity; Device control sub-entity	IoT Device або/i IoT Gateway	Отримання даних з фізичних об'єктів (OME), керування виконавчими механізмами, передача інформації далі
Digital Twin Entity	—	Забезпечує моделювання, симуляцію (імітаційне моделювання), синхронізацію, аналітику ЦД
Digital Twin Entity: Operation and Management Sub-entity	Management Entity / Service Management	Керує життєвим циклом ЦД, забезпечує підтримку, синхронізацію, оновлення моделей
Digital Twin Entity: Application and Service Sub-entity	Application Entity / Analytics / Simulation	Виконує обробку даних, моделювання, аналітику, прогнозування та генерацію звітів
Digital Twin Entity: Resource Access & Interchange Sub-entity	Resource Access Entity / Interface Gateway	Підключення до інших систем (ERP, PLM), інтероперабельність, API, контроль доступу
User Entity	IoT-Users	ERP, MES, HMI-системи або люди, які взаємодіють із ЦД через інтерфейси
Cross-system Entity	Cross-cutting Functions / Interworking Functions	Забезпечує міждоменну підтримку: переклад форматів, гарантії даних, безпеку, сертифікацію

стині встановлено базову структуру для опису спостережуваних виробничих елементів, та вказано на відповідні наявні стандарти, які можуть використовуватися для подання цих даних. У додатку А ISO 23247-3 наведено перелік таких стандартів, з коротким описом їх функціональності, а додаток В містить практичні приклади у вигляді XML-фрагментів для кожного типу ОМЕ, забезпечуючи орієнтацію розробникам під час реалізації ЦД.

Четверта частина [12] присвячена питанням інформаційного обміну між різними сутностями в межах архітектури ЦД. Тут означено технічні вимоги до мережної взаємодії та протоколів передачі даних, необхідних для підтримки синхронізації між фізичним середовищем, ЦД та користувацькими системами. Приклади організації зв'язку на різних рівнях показано в додатку А цієї частини, а у додатках В–Е — сценарії застосування. Ці сценарії охоплюють приклади застосування ЦД у дискретному виробництві. Формат опису сценарію дозволяє стандартизовано документувати сценарії використання ЦД у виробництві й полегшує їх впровадження у різних індустріях.

Майбутні частини стандарту описані в [2]. Мета стандарту ISO 23247-5 — це описати, як цифрова нитка (digital thread) забезпечує створення, зв'язок, керування і підтримку ЦД протягом усього життєвого циклу продукту. Стандарт ISO 23247-6 присвячений композитним ЦД.

IEC 63278-1 Asset Administration Shell for industrial applications — Part 1: Asset Administration Shell structure

Стандарт IEC 63278-1 «Оболонка адміністрування активів для промислових застосувань» [13] хоч і не характеризується як стандарт для ЦД, однак його структура, концепції та функціональні можливості безпосередньо відповідають вимогам, що висувуються до цифрових представлень активів у сучасних виробничих системах. Оболонка адміністрування активу (Asset Administration Shell, AAS) забезпечує уніфіковану модель опису фізичних і логічних активів, підтримує життєвий цикл активу, дозволяє взаємодію з різними зацікавленими сторонами, і завдяки цьому може розглядатися як фундаментальна технологія для реалізації ЦД у промисловому середовищі. Зокрема у додатках наведено приклад, який визнає оболонку управління активом (AAS) як одну з міжоперабельних реалізацій ЦД у контексті виробництва. Тому цей стандарт є цікавим з погляду можливої парадигми імплементації, сумісної з концепцією RAMI 4.0, поряд

зі стандартами ISO 23247, адже оболонка керування активом може розглядатися як основа для побудови ЦД у виробничих системах. Її структура, модульність і здатність до взаємодії з іншими компонентами через стандартизовані інтерфейси робить її придатною для реалізації міжоперабельних цифрових представлень фізичних активів, як це й передбачає модель RAMI 4.0.

Ключовими цілями оболонки адміністрування активів є:

- забезпечення інтероперабельності між системами і застосунками за допомогою уніфікованої структури даних; під інтероперабельністю розуміється здатність різних систем, компонентів або організацій ефективно обмінюватися, інтерпретувати й використовувати інформацію, навіть якщо вони походять від різних виробників або реалізовані на різних платформах;
- відокремлення даних від фізичного активу для підтримки цифрової трансформації та концепцій, наприклад ЦД;
- підтримка життєвого циклу активу, зокрема у проєктуванні, виробництві, експлуатації, техобслуговуванні й утилізації;
- створення модульної, розширюваної і динамічної структури цифрових описів, здатної до адаптації у складних виробничих середовищах;
- забезпечення захищеного і контрольованого доступу до інформації та сервісів активу за допомогою стандартизованих інтерфейсів (AAS interface).

Оболонка AAS містить інформацію керування оболонкою (ідентифікаційні атрибути, версійна інформація) та опис активу. AAS може репрезентувати як тип активу, так і окремий його екземпляр, що дозволяє точно прив'язати AAS до реального або логічного об'єкта у виробничій системі.

У середині AAS має підмоделі, які описують певний аспект активу, наприклад основні характеристики і конфігурації або експлуатаційні дані чи документацію. Підмоделі організовані у деревоподібні структури, що складаються з елементів підмоделі (SubmodelElements), які містять окремі одиниці інформації, та реалізують різні функції. Це можуть бути властивості з конкретними значеннями, або посилання на інші сутності або сервіси. Наприклад, елементом може бути опис напруги живлення, файл з технічною документацією, або відношення до інших активів, наприклад типу «складається з». Деякі елементи дозволяють звертатися до сервісів, пов'язаних з активом, або реалізованих самим активом через вбудовані інтерфейси.

Ще одним важливим компонентом є програмний інтерфейс AAS, за допомогою якого зовнішні програмні застосунки (так звані AAS user applications) можуть отримувати доступ до даних, модифікувати їх або виконувати сервіси. Цей інтерфейс дозволяє реалізувати доступ до AAS як у вигляді REST API, так і через промислові протоколи, зокрема OPC UA.

AAS також містить поняття сервісів активу (функціональності), які реалізуються самим активом і можуть бути викликані через AAS, або які логічно пов'язані з активом, але не реалізуються ним безпосередньо.

Важливим аспектом є вбудовані засоби безпеки та контролю доступу, які ґрунтуються на положеннях IEC 62443, що дозволяє AAS бути придатною для промислового використання в умовах високих вимог до інформаційної безпеки.

У стандарті передбачено можливість асоціювання кількох AAS з одним і тим самим активом. Це пов'язано з кількома стейкхолдерами, які мають свої потреби у цифровому представленні того самого активу, що дозволяє гнучко реалізовувати вимоги щодо функцій, інформаційної безпеки, конфіденційності, ролей доступу та локальних стратегій керування даними. Кожна AAS має свого відповідального (AAS responsible), власну структуру підмоделей та інтерфейс, і може розвиватися незалежно від інших оболонок того самого активу. У стандарті також зазначено, що хоча ці оболонки незалежні, за певних умов може відбуватись синхронізація між ними – наприклад, під час передачі інформації між виробником і користувачем, або під час оновлення даних, пов'язаних з технічним обслуговуванням чи модернізацією.

У стандарті IEC 63278-1 акцентується увага на незалежності життєвих циклів активів і оболонок адміністрування цих активів (AAS). Актив – як фізичний, так і логічний – має власну динаміку змін: його характеристики можуть змінюватись у результаті зносу, модернізації, переналаштування або зовнішніх чинників. Оболонка, яка подає цей актив у цифровій формі, також проходить свій життєвий цикл, зокрема через оновлення структурних підмоделей, зміни значень параметрів або розширення інформації. Ця незалежність означає, що зміни активу не обов'язково автоматично відображаються в його цифровому представленні. І навпаки, оновлення оболонки не гарантує, що сам актив фізично змінився. Внаслідок цього стандарт наголошує на необхідності синхронізації даних

між активом та його оболонкою. Своєчасна та точна синхронізація забезпечує достовірність цифрового опису, що критично важливо для автоматизованого керування, діагностики, планування технічного обслуговування і реалізації концепцій ЦД.

У стандарті IEC 63278-1 наведено приклад загального сценарію використання AAS, який інтегрує кілька перспектив: життєвого циклу активів, обміну цінністю між сторонами та структури самих оболонок. Цей сценарій демонструє розподілену модель ведення AAS, де кожна сторона веде свою оболонку з власним набором атрибутів і політиками доступу, при цьому зберігається узгодження через унікальні ідентифікатори та означені інтерфейси.

Додаток А цього стандарту містить огляд релевантних стандартів і джерел, які можуть використовуватись для побудови шаблонів підмоделей (Submodels) оболонки адміністрування активів. Додаток В демонструє «використовувану перспективу» (usage view) оболонки адміністрування активів, тобто описує, як різні ролі взаємодіють з AAS як системою. Додаток С присвячений темі інформаційної безпеки для промислових систем автоматизації та керування (IACS) і ґрунтується на серії стандартів IEC 62443.

ISO/IEC TR 30172 Internet of things (IoT) – Digital twin – Use cases

ISO/IEC TR 30172:2023 «Internet of Things (IoT) – Digital Twin – Use Cases» [14] є технічним звітом, який присвячений збиранню, систематизації та поданню прикладів використання ЦД (DTw) у різних галузях. Його основна мета – подати репрезентативні сценарії застосування DTw, які можуть бути використані як база для подальших робіт зі стандартизації, порівняльного аналізу, а також для визначення нових технічних вимог ринку.

Документ містить короткі, але структуровані описи дванадцяти сценаріїв використання, зібраних у вигляді шаблонів, що охоплюють ключові елементи: назву сценарію, галузь застосування, статус життєвого циклу, цифрову інфраструктуру, задіяні сутності та акторів, цілі, KPI та інші релевантні характеристики.

Окреме місце в документі займає Додаток А, який містить уніфікований шаблон опису сценарію використання. Він дозволяє систематизувати подану інформацію, враховуючи як технічні, так і організаційні аспекти впровадження ЦД.

У звіті також висвітлено набір ключових показників ефективності для рішень, що ґрунтуються на ЦД.

Загалом ISO/IEC TR 30172:2023 є платформою для обміну практичним досвідом і сприяє гармонізації підходів до побудови ЦД у контексті Інтернету речей.

ISO/TR 24464:2025 Visualization elements of digital twin – Visualization fidelity

ISO/TR 24464:2025 «Елементи візуалізації цифрового двійника – Точність візуалізації» [15] є технічним звітом, який присвячений аналізу візуалізаційної достовірності (fidelity) у ЦД, з акцентом на промислові застосування. Документ пропонує концептуальну трьохелементну архітектуру системи промислового ЦД (iDTw system), що складається з фізичного об'єкта (PTw), його цифрового представлення (iDTw) та інтерфейсу спарювання, який забезпечує обмін даними і синхронізацію між ними. Такий підхід дає змогу формалізувати структуру ЦД та означити ключові вимоги до візуалізації, моделювання і передачі даних у режимі, наближеному до реального часу.

У центрі уваги документа – оцінка візуалізаційної точності (fidelity) цифрових моделей, яку описано через просторову та часову роздільність, рівень деталізації (LoD) і якість відповідності між проєктною моделлю (наприклад, CAD) та фактичним виробом, отриманим у процесі виробництва. У звіті розглянуто методи перевірки цієї відповідності, зокрема через лазерне сканування, побудову хмар точок і аналіз відхилень. Також окреслено аспекти життєвого циклу iDTw – від концептуального проєктування до обслуговування готового виробу з використанням великих експлуатаційних даних. Документ проводить чітке розмежування між iDTw, кіберфізичними системами (CPS) і доповненою реальністю (AR), аналізуючи подібності та відмінності архітектур, ролі користувача, рівнів моделювання і джерел даних. У звіті подано низку прикладів застосування систем iDTw.

Технічний звіт також цінний своїм оглядом стандартів та каркасів ЦД. Зокрема, у Додатку С подано аналіз ключових міжнародних стандартів, пов'язаних з ЦД. У звіті розглянуто також концепцію цифрового потоку (digital thread) та підходи до оцінювання зрілості ЦД на основі багаторівневих моделей. Таким чином, стандарт ISO/TR 24464:2025 не лише формулює архітектурні та візуалізаційні основи ЦД, а й слугує своєрідним дороговказом у потоці сучасної

стандартизації, пропонуючи уніфіковану точку входу для проєктувальників, розробників і дослідників ЦД.

4. Фундаментальні означення системи цифрових двійників

Спочатку дамо означення цифрового двійника відповідно до трьох стандартів, які аналізуються.

- У ISO/IEC 30173 ЦД (digital twin, DTw) – це цифрове представлення цільової сутності з каналами передачі даних, які забезпечують узгодження фізичного й цифрового станів із відповідною швидкістю синхронізації. З погляду понять, ЦД є частковим випадком цифрової сутності.

- Згідно з ISO 23247-1 для виробництва, ЦД (digital twin) – це цифрове подання спостережуваного виробничого елемента, придатне для визначеної мети, із синхронізацією між цим елементом та його цифровим поданням. У свою чергу, цифрове подання (digital representation) – це елемент даних, що є набором властивостей спостережуваного елемента виробництва.

- У стандарті IEC 63278-1 немає означення ЦД, натомість оболонку адміністрування активів (Asset Administration Shell) розглянуто як інтероперабельну реалізацію ЦД у виробництві, яка сприяє тіснішій інтеграції як у межах кожного виміру, так і між ними. У свою чергу, оболонка адміністрування активів (Asset Administration Shell, AAS) є стандартизованим цифровим представленням активу. Про це також говориться в стандарті ISO/IEC 30173. Однак під час детального розгляду AAS стає зрозумілим, що AAS містить не лише ЦД, а й інші складові, які відокремлюються в ISO/IEC 30173 та в ISO 23247-1. Крім того, відсутність явного означення ЦД у стандарті та згадка його тільки в одному місці свідчить про те, що він більше розрахований саме на концепт розумного виробництва, а не на ЦД.

Кожне з наведених означень у будь-якому разі представляє якусь сутність в реальному світі. Наведемо означення цієї сутності у стандартах:

- У ISO/IEC 30173 це є цільовою сутністю (target entity), що виконує певну функцію в реальному світі та є об'єктом цифрового представлення. У свою чергу цільові сутності можуть бути як фізичними (які є у реальному світі і можуть бути об'єктами впливу чи вимірювання), так і цифровими (що складається з елементів даних і процедурних елементів). Тому формаль-

но ЦД, який є цифровою сутністю, може бути репрезентацією іншої цифрової сутності. У цьому немає нічого тавтологічного, наприклад програма у ПЛК може моделюватися іншою програмою, наприклад в Simulink.

- Згідно з ISO 23247-1 використовується термін спостережуваний виробничий елемент (observable manufacturing element, OME) – елемент, що має на виробництві спостережувану фізичну присутність (наприклад, персонал, обладнання, матеріали) або спостережуване функціонування (наприклад, робочий процес, температурні умови, облік документації).

- Згідно зі стандартами IEC 63278-1 AAS асоціюється з активом (asset) – сутність (окрема, композитна, група об'єктів), яка належить організації або перебуває під її опікою і яка має фактичну або передбачувану цінність для цієї організації. Сутність може бути як фізичною (наприклад, обладнання, сировина, деталі, витратні матеріали і т. п.), так і цифровою (ПЗ) чи нематеріальною (наприклад, ліцензія на ПЗ).

З наведених вище означень видно, що ці поняття мають схожість, однак ISO/IEC 30173 є більш загальним, тоді як ISO 23247 та IEC 63278 стосуються виключно виробництва. Надалі для узагальнення понять будемо використовувати означення з ISO/IEC 30173, тобто «цифровий двійник» (у вигляді цифрової сутності) та «цільова сутність». Обидві сутності функціонують у парі через двосторонній зв'язок, саме наявність такого зв'язку відрізняє його від інших подібних концепцій [1–7]. У ISO/IEC 30173 написано, що взаємодія між цифровою та цільовою сутністю має бути безперервною у межах прийнятної частоти синхронізації протягом усього життєвого циклу цифрової сутності. Нижче наведемо приклади, як цей зв'язок відображено в стандартах.

- У технічному звіті ISO/TR 24464, у якому значну увагу приділено огляду стандартів та концепцій ЦД, явно виділено двійникування (twinning interface) – це посередник, який забезпечує взаємне підсилення між ЦД та його цільовою сутністю. У інших стандартах явно виділеного поняття немає.

- У ISO/IEC 30173 є загальна фраза, що між цільовими та цифровими (двійник) сутностями відбувається з'єднання, а саме збір даних із фізичної сфери, оптимізація в цифровій сфері, прийняття рішень і внесення змін у фізичну сферу на основі цих рішень. У контексті взаємодії використовується слово «синхронізація».

- Згідно з ISO 23247-1 поняття синхронізації виділено явно, яке передбачає, що ЦД і його спостережуваний виробничий елемент мають бути оновлені до значення один одного за допомогою відповідного методу. Метод може бути подієвим або періодичним. Надалі слово синхронізація використовується в усіх контекстах різного представлення частин каркасу.

- Відповідно до стандарту IEC 63278-1, у межах AAS, як архітектурної реалізації ЦД, синхронізація не виділена як обов'язкова. Її можливо реалізувати, але вона залежить від контексту, засобів доступу, а також від технічних можливостей активу. Наприклад, якщо актив є машиною, він може мати сервіси, які надаються оболонці через інтеграцію активу. Якщо актив є пасивним, сервіси можуть надаватися іншим способом, що виходить за межі стандарту. Це відрізняє AAS-підхід від більш повноцінного ЦД, де синхронізація – це центральна властивість системи з ЦД.

5. Загальне подання системи цифрових двійників

На рис. 1–3 показано три різні схеми, які репрезентують архітектуру ЦД відповідно до трьох ключових стандартів – ISO/IEC 30173, ISO 23247 та IEC 63278 (AAS). Вони ілюструють різні способи організації компонентів системи ЦД та рівні деталізації.

Рис. 1 (ISO/IEC 30173) подає концептуальну модель системи ЦД як гібридної системи, що включає з'єднання даних між ними, а також моделей, даних та інтерфейсів, задіяних у процесі передавання даних. Система ЦД може використовувати API та інші інтерфейси для обміну даними. Водночас вона може взаємодіяти із зовнішніми модулями (наприклад, інфраструктурою) також через API або інші інтерфейси. Цифровий двійник може мати функції підключення, інтеграції, аналізу, моделювання, візуалізації, оптимізації тощо. У конкретних прикладних сценаріях система ЦД може надавати сервіси, зокрема віртуальну та фізичну інтеграцію, аналіз стану, фізичне й імітаційне моделювання, оптимізацію продуктивності. Інфраструктура – це невід'ємний компонент підтримки, необхідний для забезпечення нормальної роботи системи ЦД, яка охоплює датчики, виконавчі механізми, мережі, геоінформаційні системи тощо. До системних аспектів належить інтеграція, керування, безпека й конфіденційність, а також етика роботи з даними,

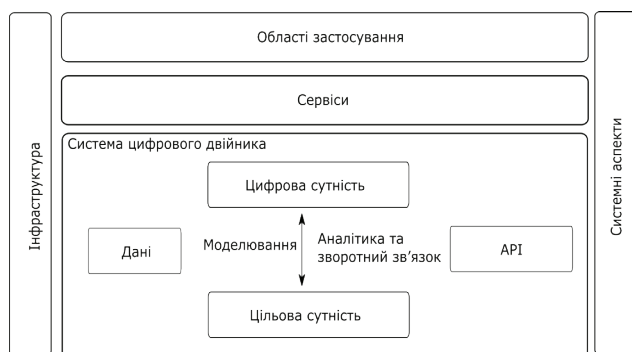


Рис. 1. Контекст системи ЦД згідно з ISO/IEC 30173

які забезпечують гармонійне співіснування системи ЦД з іншими системами в екосистемі. Область застосування — це фактично застосунки, які користуються сервісами, що у свою чергу ґрунтуються на системі ЦД.

Тепер розглянемо каркас ЦД з ISO 23247, який показано на рис. 2. Він деталізує архітектуру ЦД у контексті виробництва. Тут подано окремі сутності, включно з пристроями збору даних, ЦД, сервісними підсистемами, користувачами та крос-системними функціями. Важливим є чітке розділення функціональних областей та орієнтація на IoT-каркас ISO/IEC 30141, що робить можливим меппінг на загальну модель Інтернету речей.

Функціональна архітектура ЦД, запропонована у стандарті ISO 23247-2, структурована як набір взаємодіючих сутностей (entities), кожна з яких виконує визначені функціональні ролі. Центальною у моделі є сутність ЦД (Digital Twin Entity), яка здійснює побудову цифрового подання фізичних об'єктів, виконує синхронізацію станів, моделювання, аналітику, візуалізацію та надає сервіси іншим системам. Ця сутність поділена на три підсистеми: Operation and Management (для репрезентації, підтримки й синхронізації), Application and Service (для симуляції, звітності, аналітики) та Resource Access and Interchange (для керування доступом, інтеграції з іншими системами).

Взаємодія з фізичним виробничим середовищем реалізується через сутність Device Communication Entity, яка поділена на підсистеми збору даних (Data Collection) та керування пристроями (Device Control). Вони забезпечують зчитування інформації з виробничих об'єктів, попередню обробку сигналів, а також передачу керувальних команд. Спеціально виокремленою є користувацька сутність (User Entity), що реалізує інтерфейс для людини або зовніш-

ніх програмних засобів (наприклад, MES, ERP, HMI).

Додатково у структурі передбачена Cross-System Entity — допоміжна функціональна група, яка забезпечує міжсистемну узгодженість. Вона містить функції перетворення даних (Data Translation), забезпечення якості даних (Data Assurance) та підтримки безпеки (Security Support). В основі всієї архітектури — спостережувані виробничі елементи (Observable Manufacturing Elements), що є фізичними об'єктами, з яких збираються дані і для яких створюється цифрове відображення. Для кожного типу таких об'єктів можуть застосовуватись специфічні функціональні елементи, що враховують особливості домену.

На рис. 3 показано структуру Asset Administration Shell (IEC 63278) як цифрового представлення активу. Вона містить тільки підмоделі, які відповідають за представлення різноманітної інформації, та інтерфейс для взаємодії.

Аналіз отриманих результатів

Аналіз базової термінології та структури каркасів зі стандартів ISO 23247:2021, ISO/IEC 30173:2023 та IEC 63278-1:2023 проведено в п. 4. Тут розглянемо сумісність концепцій ЦД у цих стандартах.

Щодо ISO/IEC 30173 варто зробити кілька зауважень. По-перше, у стандарті здебільшого неявно, в контексті пояснення архітектури, ототожнюються терміни «цифровий двійник» та цифрова сутність, це видно на рис. 1. По-друге, таке саме ототожнення інколи відбувається між системою ЦД та ЦД, що вносить значну плутанину в розуміння і трактування. По-третє, система ЦД містить обидві сутності — і цифрову, і цільову. Це важливо під час трактування. По-четверте, система ЦД містить дані та API як відособлені компоненти, при цьому немає окремого компонента «модель», натомість вони можуть бути частиною (ніде не вказано, що мають) цифрової сутності. По-п'яте, за збір та обмін даними відповідає інфраструктура, і це не є частиною системи ЦД.

Порівнюючи архітектури ISO 23247 та ISO/IEC 30173 важко їх приводити до спільного знаменника. За ідеологією розробників ISO/IEC 30173, структура, наведена на рис. 1, мала б стати парасолькою для всіх стандартів, включно з ISO 23247. Однак вони суттєво відрізняються. Виділимо однозначно схожі частини:

- обидва виділяють рівень застосунків: користувацька сутність (ISO 23247) та домени застосунків (ISO/IEC 30173);

- крос-системні сутності з ISO 23247 здебільшого перекриваються з інфраструктурою та системними аспектами з ISO/IEC 30173.

Щодо критичних відмінностей, виділимо такі:

- згідно з ISO 23247, сутність ЦД бере на себе усі функції, які згідно з ISO/IEC 30173 належать до системи ЦД (окрім цільової сутності) і сервісів;

- в ISO 23247 OME не є частиною каркасу, а згідно з ISO/IEC 30173 цільова сутність є частиною системи ЦД;

- в ISO 23247 явно виділена сутність комунікації з пристроєм, тоді як в ISO/IEC 30173 така функція явно не виділена, а є частиною інфраструктури.

Очевидно такі відмінності пов'язані з генетичними зв'язками ISO 23247 зі стандартами IoT. Водночас може здатися, що ці представлення порівнювати недоречно, оскільки

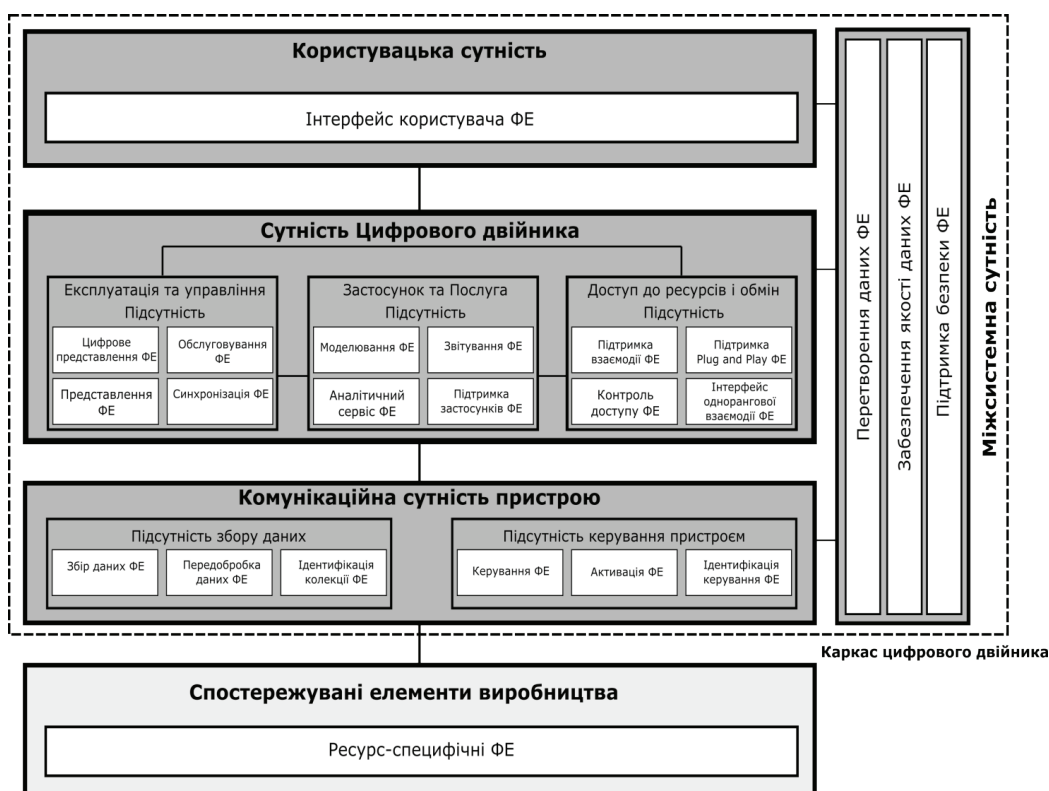


Рис. 2. Функціональний вигляд каркасу ЦД для виробництва;
ФЕ – функціональний елемент

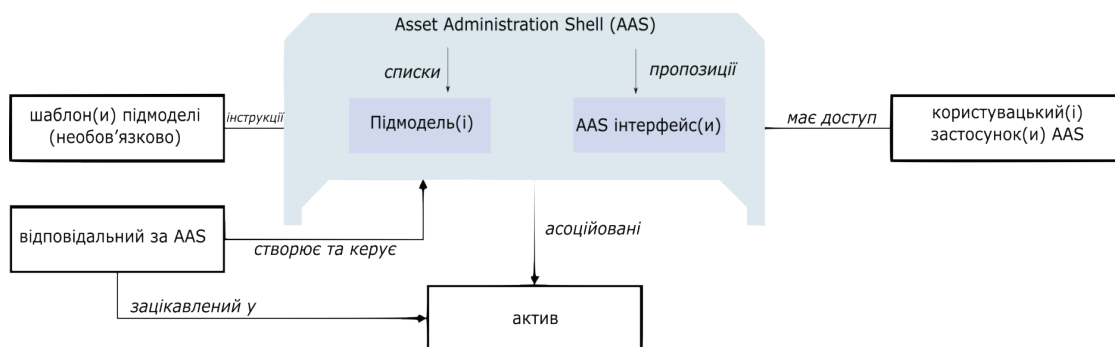


Рис. 3. Огляд оболонки адміністрування активів та пов'язаних сутностей

в ISO 23247 показано функціональний вигляд, а в ISO/IEC 30173 — контекстну діаграму. Тут варто зауважити, що функціональний вигляд, що наданий ISO/IEC 30173, взагалі є частковою інтерпретацією.

Оболонка AAS з IEC 63278-1 містить тільки підмоделі, які відповідають за представлення різноманітної інформації, та інтерфейс для взаємодії. Усе інше, що наведено в ISO/IEC 30173 та ISO 23247, або є частиною цих складових, або знаходяться поза оболонкою.

Висновки

У процесі дослідження було здійснено комплексний аналіз ключових міжнародних стандартів, присвячених ЦД, зокрема ISO/IEC 30173:2023, ISO 23247:2021 (усі чотири частини), IEC 63278-1:2023, ISO/IEC TR 30172:2023 та ISO/TR 24464:2025 та їх порівняння. Розгляд проводився через призму їх застосовності, визначення ключових термінів, бачення структури ЦД та стандартів, на яких вони ґрунтуються.

Проаналізовані документи охоплюють різні аспекти концепції ЦД: термінологію, архітектуру, інтерфейси, життєвий цикл, інформаційні моделі, приклади застосування та візуалізацію. Було встановлено, що, попри декларовану спільну мету, а саме підтримку створення, впровадження та уніфікації ЦД, розглянуті стандарти значною мірою не узгоджені між собою і не можуть бути використані в межах єдиного проектного підходу без істотної адаптації.

З формального погляду, суперечностей між ISO/IEC 30173, ISO 23247 та IEC 63278 немає, всі три стандарти розглядають ЦД як синхронізоване цифрове представлення фізичної сутності. Однак аналіз їхніх підходів до структуризації каркасу ЦД свідчить про фундаментальні розбіжності. Наприклад, ISO 23247 формує архітектуру на основі ролей у виробничому середовищі, відокремлюючи користувацькі, пристроєві та цифрові домени, тоді як IEC 63278 ґрунтується на концепції Asset Administration Shell (AAS) як цифрової обгортки навколо активу, що уособлює ЦД як контейнер для субмоделей. Зі свого боку, ISO/IEC 30173 надає концептуальний каркас, який є значно вищого рівня абстракції, не передбачаючи конкретної

реалізації, але означаючи структуру та вказуючи на необхідність синхронізації.

Таким чином, спроба спільного використання цих стандартів у межах одного життєвого циклу ЦД, наприклад, побудови цифрової нитки або міжплатформної інтеграції є непридатною без адаптаційного шару, який би мапував відмінності у представленнях цифрових сутностей, життєвих циклів, моделей взаємодії та інтерфейсів. Кожен зі стандартів відображає бачення своєї технічної спільноти (ІТ-сфери, промислової автоматизації, або розробників IoT-рішень) і не був розроблений із урахуванням взаємної інтеграції.

Натомість перевагою сучасної ситуації є наявність різноманітних підходів, що дає можливість обирати стандарти залежно від сфери застосування. ISO 23247 добре підходить для сценаріїв «smart manufacturing» з використанням платформ IoT, IEC 63278 — для машинобудування з акцентом на сервіси і структури активів та реалізації за місцем, ISO/IEC 30173 — як база для термінологічної узгодженості та системного мислення.

Перспективи подальших досліджень вбачаються:

- у побудові інтерпретаційного шару між стандартами для забезпечення семантичної сумісності; це можуть зробити тільки в межах технічних комітетів, оскільки багато змісту залишається поза офіційним документом і його важко сприймати;
- у створенні профілів впровадження для конкретних галузей (наприклад, харчова промисловість, енергетика), які обирають відповідний стандарт як основний, але інтегрують елементи інших;
- у формуванні методичних рекомендацій для вибору та впровадження стандарту ЦД відповідно до рівня складності системи, потреб життєвого циклу та наявної інфраструктури.

З огляду на це, практичне впровадження стандартів потребує не лише технічного адаптаційного середовища, а й координації між технічними комітетами ISO, IEC, ITU, IEEE та активної участі промислових консорціумів (DTC, ПС). Без цього процес стандартизації може втратити функцію рушія розвитку й додатково ускладнити роботу для розробників і впроваджувачів ЦД.

References

- [1] M. Grieves, Completing the Cycle: Using PLM Information in the Sales and Service Functions [Slides]. In *SME Management Forum*, 2002. Troy, MI.
- [2] G. Shao *et al.*, (2024). Digital Twins for Advanced Manufacturing: The Standardized Approach. In: Grieves, M., Hua, E.Y. (eds) *Digital Twins, Simulation, and the Metaverse. Simulation Foundations, Methods and Applications*. Springer, Cham, USA. https://doi.org/10.1007/978-3-031-69107-2_7
- [3] G. Shao *et al.*, (2023). An Analysis of the New ISO 23247 Series of Standards on Digital Twin Framework for Manufacturing, 2023 MSEC Manufacturing Science & Engineering Conference, New Brunswick, NJ, US, [Online]. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=935765
- [4] K. Wang *et al.*, A review of the technology standards for enabling digital twin [version 2; peer review: 2 approved]. *Digital Twin* 2022, 2:4, China. <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17549.2>
- [5] B.R. Barricelli *et al.*, A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications, in *IEEE Access*, Italy. vol. 7, pp. 167653–167671, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953499
- [6] S.M.M. Sajadieh and S.D. Noh, “From Simulation to Autonomy: Reviews of the Integration of Artificial Intelligence and Digital Twins”, *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* (2025), South Korea. <https://doi.org/10.1007/s40684-025-00750-z>
- [7] Angira Sharma *et al.*, “Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions”, *Journal of Industrial Information Integration*, United Kingdom, vol. 30, 100383 p., 2022, ISSN 2452-414X, <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383>
- [8] ISO/IEC 30173 – Digital twin – Concepts and terminology.
- [9] ISO 23247-1 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing. Part 1: Overview and general principles.
- [10] ISO 23247-2 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing Part 2: Reference architecture.
- [11] ISO 23247-3 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing Part 3: Digital representation of manufacturing elements.
- [12] ISO 23247-4 Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing Part 4: Information exchange.
- [13] IEC 63278-1 – Asset Administration Shell for industrial applications – Part 1: Asset Administration Shell structure.
- [14] ISO/IEC TR 30172:2023 – Internet of things (IoT) – Digital twin – Use cases TECHNICAL REPORT.
- [15] ISO TR 24464:2025 – Visualization elements of digital twin – Visualization fidelity.

O.M. Pupena, O.M. Klymenko, V.V. Polupan

SYSTEMATIZATION OF KEY STANDARDS FOR DIGITAL TWINS IN INDUSTRIAL MANUFACTURING

Background. A cohesive set of tools, methodologies, and, most importantly, a uniform conceptual framework are essential for the development and scaling of digital twins (DT). Given that the standards in this domain are still emerging, awareness of them is notably limited, and their content can often be challenging to understand.

Objective. The purpose of the work is to acquire responses to inquiries regarding the standards that are directly associated to DTs in the manufacturing sector, including their purpose, content, and application, as well as the feasibility of their combined utilization.

Methods. To fulfil the specified objective, an examination was conducted of publicly accessible scientific articles that reflect the viewpoints of different scientific schools. Special emphasis was placed on proceedings that focused on the topics of unification and standardization of DTs. A comprehensive re-view and systematisation of the primary principles of current standards were performed, the classification of essential terminology and structural components was undertaken, and the applicability of each standard within the framework of industrial DTs was established.

Results. The research process encompassed a thorough examination of essential international standards regarding DTs, which included ISO/IEC 30173:2023, ISO 23247:2021 (all four parts), IEC 63278-1:2023, ISO/IEC TR 30172:2023, and ISO/TR 24464:2025. A comparison was made of the main terminology concerning DTs, the target entity, and their interrelation; structural representations of DTs; concepts of DT life cycles; application domains of DTs; their relationship with other standards; and the feasibility of their combined application.

Conclusions. Although, from a formal point of view, there are no explicit contradictions between the ISO/IEC 30173, ISO 23247, and IEC 63278 standards, the analysis of their approaches to constructing DT frameworks revealed fundamental differences in their conceptual apparatus, the structure of DTs, and the underlying standards on which they rely. This results in the conclusion that utilizing them concurrently within a single DT life cycle is unfeasible unless an extra adaptation layer is implemented to guarantee their compatibility.

Keywords: digital twin; target entity; digital twin standards; life cycle; IoT.

Рекомендована Радою
навчально-наукового Інституту атомної та теплової
енергетики КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
22 червня 2025 року

Прийнята до публікації
08 вересня 2025 року